



TITLE:

非定常騒音のうるささの定量化に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

平松, 幸三

CITATION:

平松, 幸三. 非定常騒音のうるささの定量化に関する研究. 京都大学, 1979, 工学博士

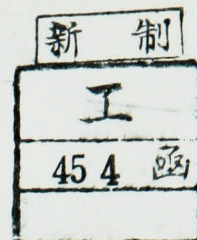
ISSUE DATE:

1979-09-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r3980>

RIGHT:



非定常騒音のうるささの 定量化に関する研究

1979 年

平 松 幸 三

非定常騒音のうるささの 定量化に関する研究

1979年

平 松 幸 三

非定常騒音のうるささの定量化に関する研究

目 次

目 次

第1章 序 論	1
1. はじめに	1
2. 変動騒音の評価方法の経緯	1
2.1. 航空機騒音の評価尺度	1
2.1.1. WECPNL	2
2.1.2. NEF	3
2.1.3. NNI	3
2.2. 変動騒音の評価尺度	4
2.2.1. TNI	4
2.2.2. NPL	4
2.2.3. L_{eq}	5
2.2.4. L_{f1}	5
2.3. 等エネルギー仮説	6
3. 研究の目的	7
参考文献	7
第2章 研究の方法に関する二、三の考察	9
1. 研究方法	9
2. ラウドネスとうるささ	9
3. マグニチュード評価法	9
4. 三角形状騒音の尺度構成	11
4.1. 比例表出法（分数法）による実験	11
4.1.1. 実験方法	11
1) 装置および刺激音	11
2) 実験手続き	12
3) 被検者	13
4.1.2. 実験結果および考察	13
4.2. 等分割法による実験	14
4.2.1. 実験方法	14
1) 装置および刺激音	14
2) 実験手続き	14
3) 被検者	14
4.2.2. 実験結果および考察	14
4.3. 修正比例法（method of corrected ratios）に関する検討	15
4.4. 一対比較マグニチュード評価法によるPSEの決定方法	17
4.4.1. 実験方法	17
1) 装置および刺激音	17
2) 実験手続き	18
3) 被検者	18
4.4.2. 実験結果	18

4. 5.	調整法による結果との比較	19
4. 5. 1.	実験方法	19
1)	装置および刺激音	19
2)	実験手続き	19
3)	被検者	19
4. 5. 2.	実験結果および考察	19
	参考文献	21
第 3 章	騒音のうるささに及ぼす立上り速度の効果	23
1.	はじめに	23
2.	実験方法	23
2. 1.	刺激音の作製	23
2. 2.	刺激音	24
2. 3.	刺激音の呈示	24
2. 4.	うるささの判定	27
2. 5.	被検者	27
3.	実験結果	27
4.	考 察	28
4. 1.	騒音のエネルギーの補正をした立上り効果	28
4. 2.	立上りについて	31
4. 3.	ピークレベルとうるささとの関係	31
5.	要 約	31
	参考文献	32
第 4 章	騒音のうるささに及ぼす継続時間の効果	33
1.	はじめに	33
2.	実験方法	33
2. 1.	刺激音の作製	33
2. 2.	刺激音	33
2. 3.	刺激音の呈示	36
2. 4.	うるささの判定	36
2. 5.	被検者	36
3.	実験結果	36
4.	考 察	43
4. 1.	反復及び男女による違い	43
4. 2.	臨界継続時間 (critical duration) について	43
4. 3.	継続時間と心理量について	44
4. 4.	等うるささ線	44
4. 5.	騒音のエネルギーとうるささ	46
5.	要 約	46
	参考文献	46
第 5 章	騒音のうるささに及ぼすレベルの変動特性の効果	49
1.	はじめに	49
2.	鋸歯状変動騒音による実験 (I)	49
2. 1.	実験方法	49

2.1.1.	刺激音	49
2.1.2.	実験手続き	50
2.1.3.	被検者	50
2.2.	実験結果と考察	50
3.	鋸歯状変動騒音による実験(Ⅱ)	52
3.1.	実験方法	52
3.1.1.	刺激音	52
3.1.2.	実験手続き	52
3.1.3.	被検者	52
3.2.	実験結果と考察	52
4.	1次の自己回帰型ランダム変動騒音	53
4.1.	実験方法	53
4.1.1.	刺激音	53
4.1.2.	刺激音の作製	55
4.1.3.	実験手続き	55
4.1.4.	被検者	55
4.2.	実験結果	55
5.	正弦波状変動騒音	56
5.1.	実験方法	56
5.1.1.	刺激音	56
5.1.2.	刺激音の作製	57
5.1.3.	実験手続き	57
5.1.4.	被検者	57
5.2.	実験結果	57
6.	2次の自己回帰型ランダム変動騒音	57
6.1.	実験方法	58
6.1.1.	刺激音	58
6.1.2.	刺激音の作製	58
6.1.3.	実験手続き	58
6.1.4.	被検者	58
6.2.	実験結果	59
7.	考 察	60
7.1.	レベル変動の標準偏差とうるささ	60
7.2.	変動騒音の評価尺度	62
8.	結 論	62
	参考文献	63
第6章 騒音のうるささに関する等エネルギー仮説の検討		65
1.	はじめに	65
2.	一車線等間隔モデルに基づく道路交通騒音の模擬騒音を用いた実験(実験1)	65
2.1.	実験方法	65
2.1.1.	刺激音	65
2.1.2.	刺激音の作製	65
2.1.3.	実験手続き	66
2.1.4.	被検者	66
2.2.	実験結果	66

3. 等エネルギー仮説の検討（実験 2, 3）	67
3.1. 実験方法	68
3.1.1. 刺激音	68
3.1.2. 刺激音の作製	70
3.1.3. 実験手続き	70
3.1.4. 被検者	70
3.2. 実験結果	70
4. おわりに	74
参考文献	74
 第 7 章 心理量の加算に基づく変動騒音の評価法	75
1. はじめに	75
2. 変動騒音の心理量の加算に基づく ESL の算出方法	75
2.1. 心理量の加算性と ESL	75
2.2. レベルの確率密度関数と ESL	76
3. ESL の計算値と実測値との比較	77
4. 実効騒音レベルの計算値（ESLcal）の意義	81
4.1. 騒音の評価尺度としての ESLcal	81
4.2. 継続時間と ESL	81
4.3. 騒音の発生回数と ESL	86
5. あとがき	86
参考文献	88
 第 8 章 新幹線騒音および模擬騒音のうるささの定量化	90
1. はじめに	90
2. 模擬騒音および新幹線騒音と基準音との一対比較マグニチュード評価法実験	90
2.1. 実験方法	90
2.1.1. 装置および刺激音	90
2.1.2. 実験手続き	90
2.1.3. 被検者	90
2.2. 実験結果および考察	90
 結 言	95
 謝 辞	97

第 1 章 序 論

第1章 序 論

1. は じ め に

心理学者のOsgood¹⁾は環境を「中枢神経系における神経エネルギーのパターン」であると定義する。行動科学の立場からすれば、環境というものは人間の外側にあるもの、人間をとりまくものではない。外界から受ける物理的・化学的刺激は感覚受容器で神経インパルスに変換されて中枢神経系に伝達される。中枢神経系では送られた神経情報に応じた神経系の活動が行なわれ、その活動によって知覚が生じ、時に刺激に対する反応が生じると考えられる。即ち、中枢神経系における神経エネルギーのパターンが外界を環境たらしめるというのである。

Osgoodの定義が、環境汚染で問題となる環境の定義として必ずしも一般的であるとはいえないが、少なくとも生活環境の快適性に係る環境汚染（騒音公害はその典型である。）に対してはOsgoodの定義はよくあてはまるであろう。

本論文の主たる題目である、「騒音」は「望ましくない音」²⁾と定義され、定義そのものに主観的要素が入っている。更に、音は、「(1)弾性波で、正常な聴力をもつ人に、聴覚的感觉をおこす周波数範囲のもの。(2)上の弾性波によっておこされる聴覚的感觉。」と定義³⁾され、音そのものも心理現象として定義されている。つまり、騒音とは、外界の物理刺激によっておこされる聴覚的感觉のうち望ましくないもの、ということになり、騒音も中枢神経系における神経エネルギーのパターンであると解せられるのである。

騒音が心理現象であるという事実や環境をOsgood流に定義することの意味するところは、騒音の研究は、物理学的に音を研究するだけではほとんど無意味なものとなる、ということである。騒音は、それを予測するにせよ、評価するにせよ、その影響を予測するのであり、影響に基づいて評価するのであるから、騒音の物理量と影響との関係が明らかになって、はじめて騒音の物理量を予測したり、騒音を軽減したりするための物理学的研究が意味をもつ。

要するに、騒音は心理現象である。そして本研究では、この考えを基本的立場としており、この立場に立って、非定常騒音の評価に必要な基礎的知見を得ることを目的としている。

2. 変動騒音の評価方法の経緯

あらゆる騒音は非定常である。通常定常騒音と呼ばれる騒音も、「はじまり」と「おわり」がある限り、それは非定常であって、定常というのは限定された範囲でしか成立しない。従って、騒音の評価方法は、非定常騒音の評価方法が確立されてはじめて完全なものとなる。

しかし、非定常騒音は、それを記述すべきパラメータが数多くあって、時間的要素と周波数的要素との両者を同時に取扱うことは、不可能ではないにせよ、現実的ではなかった。このため、歴史的には、周波数的要素がまず取扱われ、1秒以下の音を用いた聴取実験が積重ねられた。その結果、現在では周波数構成の問題はほぼ解決したといっ

てよく、loudness⁴⁾とperceived noisiness⁵⁾の計算法がISOで採用されるまでになっている。

一方、時間的要素については、その心理的影響が十分明らかにならないまま、現実の騒音を評価する必要が生じたため、当座の必要を凌ぐ方法が考えられてきた。その一つに、レベルの中央値(L_{50})がある。これは、JIS⁶⁾で採用され、「騒音に係る環境基準」もこれによって定められている。レベル変動が大きい騒音のレベルを L_{50} で表わすことは支障ないであろうが、一般的な騒音に L_{50} を評価尺度とするだけ十分な根拠があるわけではない。 L_{50} では無視しているレベルの変動特性（例えば変動巾）によってうるさがり異なるかも知れず、もしそうならレベルの変動巾を明示的に含む評価尺度を用いる必要がある。

レベルの非定常性をいかに定量化して、評価尺度にとり入れるかが、非定常騒音の評価方法の歴史である。この種の試みが最初になされたのが航空機騒音の評価においてであるので、まず航空機騒音の評価尺度から述べる。

2.1 航空機騒音の評価尺度

バックグラウンドレベルが低いところへ、1日数機乃至数百機の航空機が飛来する場合に、その地域の騒音を L_{50} で表現すれば、 L_{50} はバックグラウンドレベルより僅かに高くなるに過ぎず、うるささに十分対応しなくなる。この点を改善するため、航空機騒音の評価方法において、騒音の非定常性を取り入れる努力がなされた。ここでは、航空機騒音の評価尺度として代表的なWECPNL、NEF、NNIについて要点を述べる。

2.1.1 WECPNL (Weighted Equivalent Continuons Perceived Noise Level)^{7) 8)}

航空機騒音は、まず1機毎の騒音を評価し、それがN機飛行した場合の評価を行なうという手順で評価される。WECPNLの場合には、1機毎の騒音の評価はEPNL (Effective Perceived Noise Level) によってなされる。EPNLとは、航空機騒音とうるささが等価でかつ10sの継続時間を有する定常騒音のレベルを意味する。すなわち、Fig.1のようなレベル変動を呈する航空機騒音の時刻tにおけるレベル(PN-dB)をPNL(t)とすると、EPNLは

$$EPNL = 10 \log_{10} \left\{ \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} 10^{\frac{PNL(t)}{10}} dt \right\} \quad (1)$$

で表わされる。ただし、 $T_0 = 10$ s。注(p.8)参照
EPNLは航空機騒音と「うるささが等価」な定常騒音のレベルであると考えなければならないが、実際は式(1)から明らかなように、「周波数の重みづけをしたエネルギーが等価」な定常騒音のレベルとして定義されている。PNL (Perceived Noise Level) の算出の基礎となる perceived noisiness (noy) が時間的に加算できるなら、時々刻々変化する航空機騒音の perceived noisiness の総和に等しい perceived noisiness の総和を有する定常騒音のレベルとして EPNL を定義することができる。この時 EPNL に

対応する perceived noisiness (PN) を effective perceived noisiness (EPN) とすると、

$$EPN = \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} PN(t) dt \quad (2)$$

となる。一般に PNL と PN とは

$$PNL = 40 + 10 \log_2 PN \quad (3)$$

の関係にある⁹⁾から、式(1)~(3)より

$$\begin{aligned} EPNL &= 40 + 10 \log_2 EPN \\ &= 40 + 10 \log_2 \left\{ \frac{1}{T_0} \int_{-\infty}^{\infty} 2^{\frac{PNL(t)-40}{10}} dt \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

となる。しかし、後述(第7章)するように、心理量(今の場合PN)の単純な時間的加算性は成立せず、式(4)によって計算した EPNL は実験成績とは矛盾する。

1日にN回の飛行がある場合には、次のようにして評価する。まず、各々の飛行の EPNL から次式に従って TNEL (Total Noise Exposure Level) を算出する。

$$TNEL = 10 \log \sum_{n=1}^N 10^{\frac{EPNL(n)}{10}} + 10 \log \frac{T_0}{t_0} \quad (5)$$

ここに EPNL(n) は n 番目の運航に対する EPNL を示し、Nは機数である。 T_0 は10s、 t_0 は1sに

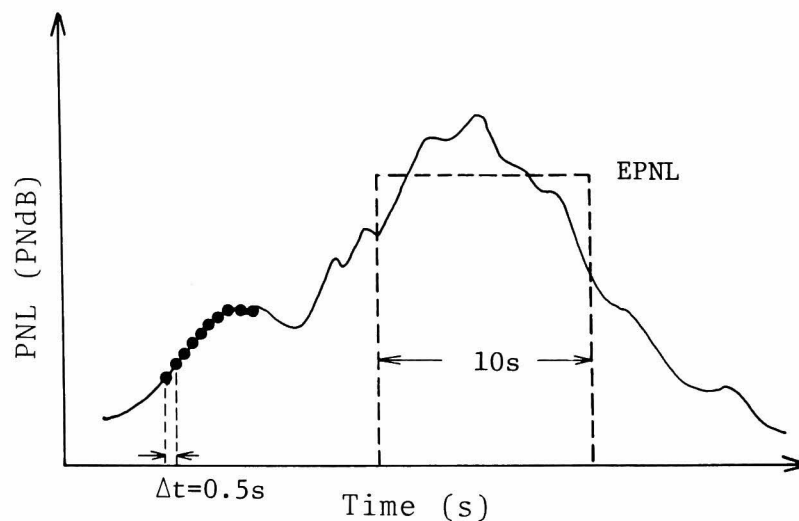


Fig. 1 Level fluctuation of aircraft noise and Effective Perceived Noise Level.
Measurement is made every half a second.

とられている。すなわち、*TNEL* はある観測地点における航空機騒音の1日分のエネルギー量（但し、周波数の重みはついていない。）である。次に *TNEL* から、次式を用いて *ECPNL* (Equivalent Continuous Perceived Noise Level) を計算する。

$$ECPNL = TNEL - 10 \log \frac{T}{t_0} \quad (6)$$

ただし、*T* は1日、1月、1年等の秒単位の値である。つまり、*ECPNL* はエネルギーの平均値をレベルで表示した値である。

ECPNL の計算において、飛行回数を夕方3倍に、夜間は10倍に数えるというように *N* に対する重みづけを行なったのが *WECPNL* である。

このように、*WECPNL*（より正確には *ECPNL*）は、エネルギーの加算と平均化に基づいて定義されているので、同一の騒音が繰返される場合の回数効果は $10 \log N$ (*N* は回数) で表わされ、又継続時間が2倍になることは、騒音レベルの増加では何 dB の増加に相当するかという、いわゆる継続時間効果は 3 dB/doubling と表わされる。この考え方の基盤となっているのは「等エネルギー仮説」すなわち「複数の騒音のエネルギーが等しい時には、それらの騒音のうるささも等しい。」という仮説である。

（ただし、我が国が現在航空機騒音の環境基準を定めるにあたって採用している *WECPNL* は簡便法によっているので、ここで述べた方法は採用されていない。）

2.1.2 NEF (Noise Exposure Forecast)⁹⁾

NEF はアメリカで用いられている航空機騒音の評価尺度であり、次式で表示する。

$$NEF(ij) = EPNL(ij) + 10 \log \left\{ \frac{N_d(ij)}{K_d} + \frac{N_n(ij)}{K_n} \right\} - C \quad (7)$$

ただし、*i* は機種を、*j* は飛行経路を示し、添字の *d* は昼間 (0700 ~ 2200) を、同じく *n* は夜間 (2200 ~ 0700) を示す。*N* は運行回数で、*K* は運行回数の補正值である。*K_d* は昼間20回の飛行回数の場合の補正值を0とするよう *K_d* = 20 と定められた。*K_n* は1時間当りの平均運航回数が昼間と夜間とで等しい場合に、夜間の運航は昼間の運航より *NEF* の値で10だけ高くなるように定められた。夜間は9時間、昼間は15時間であるから

$$10 = 10 \log \frac{K_d}{K_n} \cdot \frac{9}{15}$$

より、*K_n* = 1.2 となる。つまり、夜間の1回の運航は昼間の17回に相当する。*C* の値は任意であるが他の評価量と区別し易いように75と決められている。

以上の値を代入すれば、

$$NEF(ij) = EPNL(ij) + 10 \log \left[N_d(ij) + \frac{50}{3} N_n(ij) \right] - 88 \quad (8)$$

NEF(*ij*) は、機種 *i* の航空機が経路 *j* を昼間 *N_d* 回、夜間 *N_n* 回飛行した時の値である。ある地点における *NEF* は *NEF*(*ij*) を *i* と *j* に関するエネルギー加算によって求められ、

$$NEF = 10 \log \sum_i \sum_j 10^{\frac{NEF(ij)}{10}} \quad (9)$$

と表示される。すなわち、*NEF* も *WECPNL* と同様に「エネルギー仮説」に基づいている。

2.1.3 NNI (Noise and Number Index)¹⁰⁾

NNI はロンドンヒースロー空港周辺における騒音測定と住民反応の調査結果¹⁰⁾ から得られた評価尺度であり、次式で示される。

$$NNI = \overline{PNL} + 15 \log N - 80 \quad (10)$$

ただし、*N* は航空機の運航回数、*PNL* は各航空機の通過時のピークレベル (*PNL_i*) のパワー平均レベルである。即ち、

$$\overline{PNL} = 10 \log \frac{1}{N} \sum_i 10^{\frac{PNL_i}{10}} \quad (11)$$

$\log N$ の係数の15という値は、運航回数が4倍になると *PNL* が9 *PN-dB* 増加することとに匹敵するというグラフ上の観察から得られたものである。又、定数の80という数字は *NNI* が0の場合は不快感も0となるように定められた。*PN-dB* = *dBA* + 13⁸⁾ とすれば、

$$NNI = \overline{L_A} + 15 \log N - 67 \quad (12)$$

ただし、*L_A* は騒音レベル (*dBA*) のパワー平均レベル。

ヒースロー空港ではその後第2次調査¹¹⁾ が行なわれ、その際第1次調査の成績に基づいて重回帰分析を行なった結果、

$$NNI = \overline{PNL} + 24 \log N - 70 \quad (13)$$

とすることがより妥当であることが判明した。第2次調査の成績に基づいた重回帰分析の結果では、*NNI* の表示は航空機の運航方式によって異なり、3ヶ月/全運航方式/昼間 では

$$NNI = \overline{PNL} + 4 \log (N + 1) - 80 \quad (14)$$

3ヶ月/最も騒音のひどい運航方式/昼間 では

$$NNI = \overline{PNL} + 12 \log(N+1) - 87 \quad (15)$$

1ヶ月/全運航方式/昼間 では

$$NNI = \overline{PNL} + 5 \log(N+1) - 81 \quad (16)$$

であった。一般に NNI と住民反応との相関係数は $\log N$ の係数の変化に対して鈍感であり、2から22まで係数の値を変化させても、重相関係数に著名な差が認められなかった。従って、 NNI を従来通り式(10)で表示しても予測性能が大きく低下することはないと考えられる。しかし、2次調査の結果では、運航回数については対数を用いない方が重相関係数が高かった。この場合の式(10)に相当する計算式は

$$NNI = \overline{PNL} + 0.1(N+1) - 70 \quad (17)$$

である。

2.2 変動騒音の評価尺度

レベルが大巾に、不規則かつ連続的に変動する騒音を変動騒音と呼んで、他の非定常騒音と区別することがある。変動騒音の典型的な例は、道路交通騒音を中心とした街頭騒音である。この種の騒音には前記航空機騒音の評価尺度を用いることができないので、別に多くの評価尺度が提案されている。本節では、そのうち最初の評価尺度である TNI 、レベルの変動巾を考慮した NPL 、レベルの変動速度を考慮した L_{eq} 、レベルの変動周波数を考慮した L_{f1} について概説する。

2.2.1 TNI (Traffic Noise Index)¹²⁾

変動騒音の評価尺度として最初に提案された尺度であり、次式で示される。

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \quad (18)$$

ここに、 L_{10} 、 L_{90} はそれぞれ騒音レベルの80%レンジの上下端値である。

TNI はロンドン市内で行なわれた交通騒音に関する調査結果に基づいて導かれた。その特徴は、バックグラウンドレベルとして L_{90} をとり、それとピークレベルに近い L_{10} との差 ($L_{10} - L_{90}$) でレベルの変動巾を表わして、尺度にとり入れていることである。($L_{10} - L_{90}$) の係数は住民の不快感との相関が高くなるように4と定められ、定数項の値の30は任意に定められた。

TNI は騒音レベルの変動巾を考慮した評価尺度として有名であるが、実際には用いられることが少ない。その理由は、 TNI が以下のような欠点をもっているためと思われる。第1にこの調査

で行なわれた騒音測定では1時間に100秒しか録音しておらず、これから算出した L_{10} 、 L_{90} の値に信頼性が乏しい。従って、 TNI が住民の不快感との相関が高いと言っても、この調査で得られた資料に関してのみ言えることであり、一般性に欠ける。また、 $TNI \leq 74$ では平均人が不快感を抱く可能性は1/40程度であると言われるが、定常音に対して TNI を適用すれば、 $TNI = 74$ の時そのレベルは104 dBA という異常な値になる。⁹⁾

2.2.2 NPL (Noise Pollution Level; L_{NP})

①等エネルギー仮説の応用、②変動騒音のうるさは等エネルギー仮説で予想されるうるささ以上である、③平均レベルに対する変動巾がうるさに寄与する、という三つの根拠に基づいて

$$NPL = L_{eq} + K \cdot \sigma \quad (19)$$

が提案された。¹³⁾ここに σ は騒音レベルの標準偏差であり、変動巾の指標である。(L_{eq} は後出。)

K の値は TNI の導出に用いられた資料を用いて、次のようにして決定された。今、

$$X(a, b) = L_{50} + a(L_{10} - L_{90}) + b(L_{10} - L_{90})^2 \quad (20)$$

によってよくうるさが説明されるとする。

$b = 1/56$ とすると $L_{50} + (L_{10} - L_{90})^2/56$ は L_{eq} に匹敵するので、 $X(a, b)$ とうるささとの相関が最大となるように a を決めると、 $a = 1.55$ となり、この時の相関係数は TNI を用いた時のそれを上まわった。また、

$$X = L_{eq} + a(L_{10} - L_{90}) \quad (21)$$

として同様に a を決定すると、 $a = 1.1$ となった。 a の値の1.55或いは1.1を1.0と丸めても相関係数及び偏差が大きく変らないので $a = 1.0$ とし、更に騒音レベルが正規分布するとして ($L_{10} - L_{90}$) を σ で表現すれば $K = 2.56$ という値を得る。故に NPL は

$$NPL = L_{eq} + 2.56 \sigma \quad (22)$$

と表示される。騒音レベルとしてはdBA又は $PNdB$ がよく用いられる。騒音レベルが正規分布する場合には $a = 1$ 、 $b = 1/56$ として式(20)又は(21)によって NPL を算出してもよい。

提案者のRobinsonは NPL の心理学的な意味づけとして、 L_{eq} の項を順応水準とみなし、変動巾の項を順応水準から隔たることによるうるささであると考えた。彼は航空機騒音の模擬音が1日に10~700回発生するとして、発生回数の変化による NPL の変化を NNI のそれと比較した結果両者がよく一致すること、等の理由から NPL は航

空機騒音をも含めて一般的な騒音の評価に用いると主張する。

しかし、 TNI を導出した資料に基づいている限り、 NPL も TNI と同様に信頼性に欠け、 K の値にも疑問が生ずる。また、例えば Fig.2 に示すようなレベル変動をする騒音を考えると、前半の定常音と後半の変動音とでは、変動音の最大レベルが定常音のレベルより 22.6 dB も低いのに両者の NPL は等しくなる。これは NPL が変動巾の効果を過大に見積っているためである。Fig.2 の騒音の場合には、全体を通して NPL を計算すると前後半部の各々の NPL より 15 dB も高くなる²⁶⁾

2.2.3 L_{eq}'

騒音レベルの変動巾が等しい場合には、 TNI 、 NPL は等しいが、レベルの変動の緩急によっても、うるさは異なる可能性がある。Muller¹⁴⁾ は、レベルの変動の激しさをレベルの変動速度 (dL/dt) で表現し、 L_{eq} に対して変動の激しさによるうるささの増加量を補正した尺度を考えて、これを L_{eq} で表わした。すなわち、

$$L_{eq}' = L_{eq} + f(\sigma') \quad (23)$$

$$\sigma' = \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dL}{dt} \right)^2 dt \right]^{1/2} \quad (24)$$

但し、 T は騒音の継続時間である。 $f(\sigma')$ の関数形は、人間の反応との相関が高くなるように決定されるが、暫定的に

$$f(\sigma') = 10 \log (1 + 15 \sigma') \quad (25)$$

と定められている。

L'_{eq} の適用の妥当性については検証は行なわれていない。

2.2.4 L_{fl} (fluctuation level)¹⁵⁾

スウェーデンで提案された L_{fl} は平均レベルの項と変動周波数の項とからなる。

$$L_{fl} = 20 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T |p(t)|^k dt \right)^{1/k} + C \log (FR) \quad (26)$$

ただし、 $p(t)$ は時刻 t における音圧に A 特性の重みづけをしたもの、 T は対象となる騒音の継続時間、 k 、 c は定数、 FR は変動周波数に関する量である。 $k = 2$ 、 $c = 0$ とすれば L_{fl} は L_{eq} に一致し、 $k \rightarrow \infty$ とすれば L_{fl} はピークレベルになる。 FR は次のようにして求める。即ち、騒音レベルの変動をスペクトル分析して得たパワースペクトルを図 3 にプロットすれば、図中の曲線群から各点に相当する FR の値が読みとられるのでその最大値をもって FR の値とする。 k と c の値はうるささとの相関を高くするように定められた。騒音計の動特性はインパルス騒音計の動特性を用いた場合に最も高い相関が得られ、 $k = 1.7$ 、 $c = -5.25$ となる。従って、

$$L_{fl} = L_{eq_{1.7}} - 5.25 \log (FR) \quad (27)$$

ただし、 $L_{eq_{1.7}}$ は式 (26) の右辺第 1 項の k を 1.7 とした値である。普通騒音計や精密騒音計の fast の動特性で測定する場合は、 $k = 2.0$ 、 $c = -6.5$ を用いる。すなわち、

$$L_{fl} = L_{eq_{2.0}} - 6.5 \log (FR) \quad (28)$$

式 (27) 及び (28) は、 FR が大きい程うるささが小さく

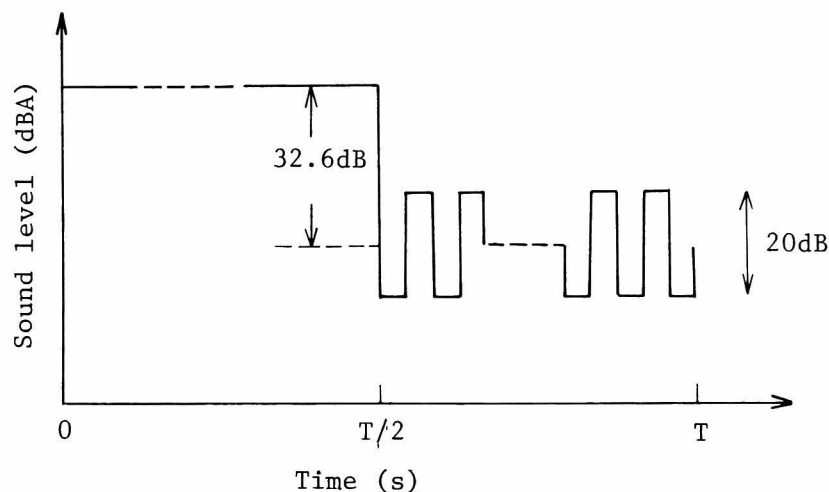


Fig. 2 Level time history with same NPL values in the sub-intervals $(0, T/2)$ and $(T/2, T)$.

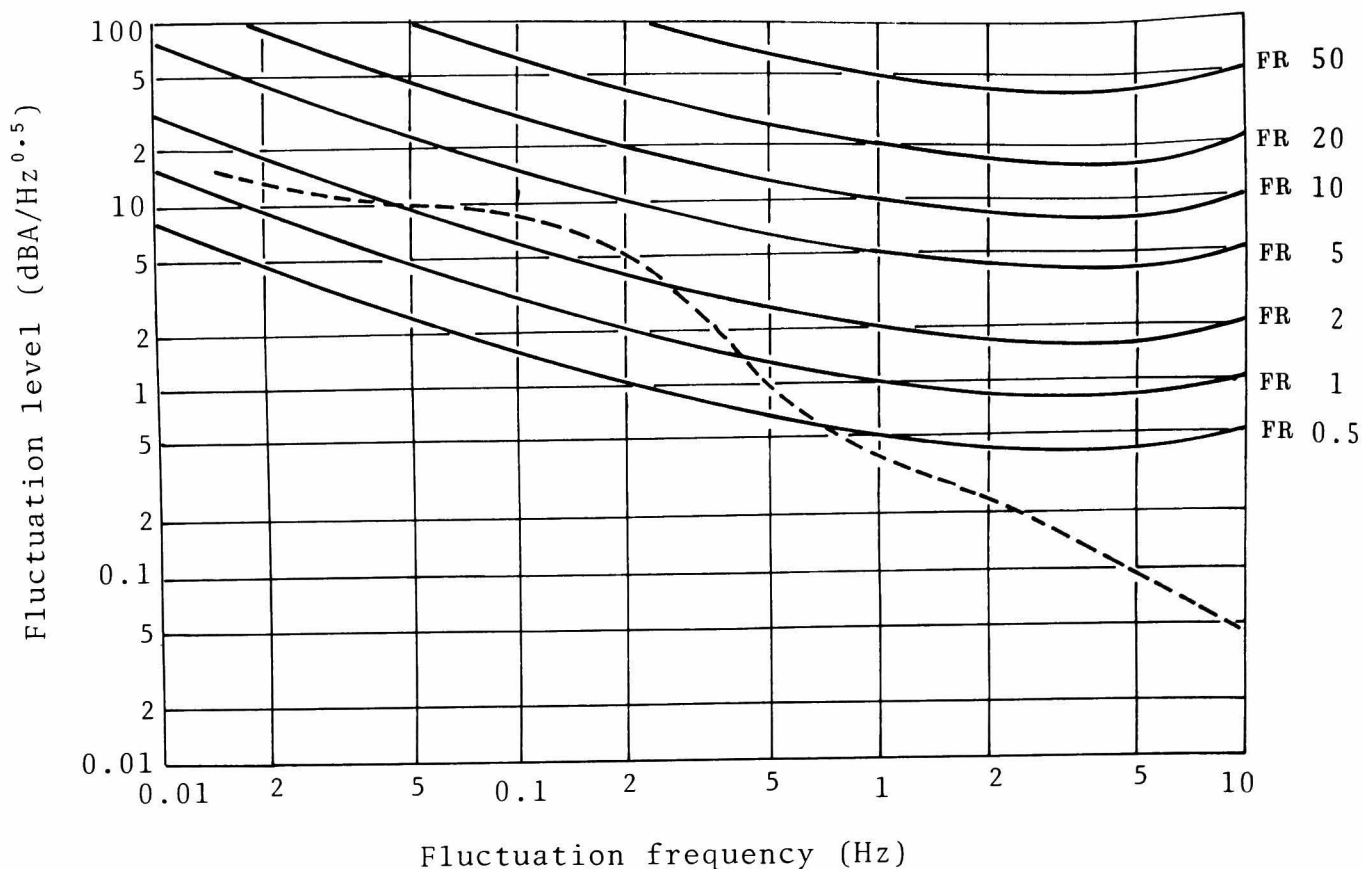


Fig. 3¹⁵⁾ Frequency smoothed power spectral density of the dBA-history as a function of the fluctuation frequency. (Spectrum is plotted in a diagram with rating-curves for fluctuations with respect to the subjective frequency-response.)

Fluctuation rating (FR): 3dBA

なることを示している。つまり、 L_{eq_k} が等しいなら変動騒音より定常騒音の方がうるさいということになる。

2.3 等エネルギー仮説

複数の騒音の総エネルギーが互に等しい時、それらの騒音によってもたらされる生理的・心理的影響も等しい、という考えを「等エネルギー仮説」という。これに基づいて作られた評価尺度が L_{eq} (Equivalent Sound Level; 単位は dBA) であり、次式で定義される。

$$L_{eq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \quad (29)$$

ただし、 T_0 は L_{eq} を定義する時間、 $L(t)$ は時刻 t における騒音レベル (dBA) である。

一般的には「等エネルギー仮説」の成立しないことは、既に知られている。例えば、騒音性難聴の発現の指標となる聴覚の一時的閾値移動 (Temporary Threshold Shift; 以後 TTS と称す。) は、暴露時間の対数に比例して増加し、その比例定数は、暴露音のレベルが高い程、大きい。¹⁶⁾ すなわち、暴露時間が2倍になった時の TTS の増加量は暴露音のレベルが高い方が大きい。しかし、等エネルギー仮説に立脚すれば、この比例定数は一定になり、暴露音のレベルによっては変化しない。言いかえると、等エネルギー仮説によっては、TTS の growth を説明することができない。或いはまた、間欠性騒音を暴露した時に生じる TTS は、休止

時間(off-time)中に回復するが、等エネルギー仮説及びそれに基づく L_{eq} の概念においては休止時間中の回復は考慮されていない。このように、騒音の影響のうちで、比較的長時間の暴露の影響を精度よく測定し得るTTSの現象において、「等エネルギー仮説」が否定されているのである。にもかかわらず、騒音の聴力への影響に関するISOの規格¹⁷⁾、EPAのクライテリア¹⁸⁾の作成においては「等エネルギー仮説」が採用されている。それは、仮説を正しいと認めたためではなく、単純化の方法としては近似の度もよく、かつ受け容れられ易いからであると考えられる。

騒音の心理影響の分野では、航空機騒音の評価尺度に用いられるWECPNL, NEFにおいては「等エネルギー仮説」が採用されているが、同じく航空機騒音の評価尺度であるNNIにおいてはこれは採用されていないし、又NPL等のレベルの変動特性の補正を行なう評価尺度においてはこの仮説は否定されている。しかし、聴力への影響の場合と同様に、ISO¹⁹⁾ EPA²⁰⁾ではこの仮説を採用して心理的影響を評価しており、さらに、 L_{eq} がうるささとよく対応するという報告も行なわれている^{21)~24)}。このため、今後 L_{eq} を変動騒音の評価尺度として用いようとする機運が高まると考えられる²⁵⁾。「等エネルギー仮説」が騒音の心理的影響の場合に成立するかどうかは、暫く措くとしても、この仮説に立脚すれば、心理量の時間的積分過程において、人間は、まずエネルギーを積分し、その後で心理量に変換していると考えるか、或いは各瞬間のエネルギーに比例した心理量を積分していると考えなければならない。前者の考え方は荒唐無稽であるし、後者の場合、心理量がエネルギーに比例するという点がloudnessが音の強さの1/3乗に比例するという実験結果に矛盾する。

このように、「等エネルギー仮説」では現象を説明することはできない。これを用いて騒音を評価したり、これに立脚した評価尺度を用いたりするのは、便宜上の理由によるのであることをここでは指摘しておく。

3. 研究の目的

非定常騒音の評価法の要諦は、うるさを規定すると考えられる非定常騒音の物理性状を一次元尺度化することにある。この一次元尺度と反応との関

係は単調でさえあれば、必ずしも線型である必要はない。ただし、定常騒音は変動騒音の特殊な場合であるから、定常騒音に対しても矛盾なく適用できる尺度でなければならない。できれば、うるささが変動騒音のそれと等価な定常騒音のレベルを、変動騒音のレベル記録から算出し、その定常騒音のレベルを尺度として用いることが望ましい。

非定常騒音の評価尺度は、その経緯に関連して触れたように、レベルの非定常性を無視して作られたものと、非定常性を何らかの形で明示的にとり入れて作られたものとがある。この両者の違いは、レベルの非定常性とうるささとの関係があるとみるか、ないとみるかの違いによる。また、「等エネルギー仮説」に立脚するか否か、ということも評価尺度を作る場合に重要である。この場合、基本的には非定常性がうるささに及ぼす効果を無視しているが、継続時間(T)や回数(N)の効果を、 $10 \log T$, $10 \log N$ として明示的に表示することも可能となる。さらに、冒頭で述べたOsgoodの考え方に立脚すれば、変動騒音を聴いている時、時々刻々変化するのは心理量なのであるから、この心理量が積分され、平均化される機序を解明する必要がある、これがなされてはじめて、非定常騒音の評価尺度を作り得るということになる。

このような問題があることを考慮して、本研究では、次の四つを目的とする。

- 1) 騒音のレベルの時間的非定常性がうるささに及ぼす効果を明かにすること、
- 2) 「等エネルギー仮説」を検証すること、
- 3) 1), 2)の結果に基づいて、既往の評価尺度の妥当性を検討すること、
- 4) 心理量の加算性を検討し、心理量の加算に基づく非定常騒音の評価法を開発すること。

なお、本研究では非定常騒音の評価尺度について詳細に検討を加え、評価法の基礎となる、知見を得ることを目的としており、騒音の許容基準等を設定するための知見を得ることを目的とはしていない。

参 考 文 献

- 1) C.E.Osgood : Method and theory in experimental psychology, Oxford Univ. Press, N.Y., (1953) p.2
- 2) JIS Z 8106 : 音響用語 (一般) (1961) 1084
- 3) 同上 1068
- 4) ISO-532 : Method for calculating loudness level, (1966)

- 5) ISO-507 : Procedure for describing aircraft noise around an airport, (1970)
- 6) JIS Z 8731 : 騒音レベル測定方法, (1966)
- 7) K.D.Kryter : The effects of noise on man, Academic Press, N.Y. (1970) p.269
- 8) International Civil Aviation Organization : Report of the special meeting on aircraft noise in the vicinity of aerodromes Montreal, Doc, 8857 (1969)
- 9) T.J.Schultz : Community noise ratings, Applied Acoustics, Supplement No.1, (1972)
- 10) NOISE : Final report of the Committee on the problem of Noise, Sir A. Wilson, Chairman. Cmd, 2056. Her Majesty's Stationery Office, London (1963)
- 11) Department of Trade and Industry : Second survey of aircraft noise annoyance around London (Heathrow) airport. Her Majesty's Stationery Office, London (1971)
- 12) I.D.Griffiths and F.J.Langdon : Subjective response to road traffic noise. J.Sound Vib., 8 (1) (1968) p.16
- 13) D.W.Robinson : The concept of Noise Pollution Level. NPL aero report Ac. 38 (1969)
- 14) J.L.Muller : Assessment of annoyance due to varying noise levels with particular to aircraft noise. J.Sound Vib., 19(3) (1971) p.287
- 15) O.Bennerhult, B.Lundqvist, N.A.Nilsson and P.Voigt : A method for rating fluctuating noise. Doc. D12, Swedish Council for Building Research (1977)
- 16) 高木興一 : 産業騒音の許容値に関する研究. 京都大学学位論文 (1968) p.172
- 17) ISO 1999 : Assessment of occupational noise exposure for hearing conservation purposes. (1971)
- 18) The U.S.Environmental Protection Agency : Information on levels of environmental noise requisite to protect public health and welfare with an adequate margin of safety. 550/9-74-004(1974) p.17
- 19) ISO R-1996 : Assessment of noise with respect to community response. (1971)
- 20) 前掲 18) p.20
- 21) 難波精一郎, 中村敏枝, 安田園子 : レベル変動音の大きさについて (続) — エネルギー平均値との関係 — Jap.J.Psychol. 43(5), (1972) p.251
- 22) 難波精一郎, 中村敏枝, 桑野園子, 加藤徹 : 自動車交通騒音の大きさについて, 音響学会誌, 32(3) (1976) p.126
- 23) 難波精一郎, 桑野園子, 加藤徹 : L_{eq} , L_{α} と大きさの関係について, 34(5) (1978) p.301
- 24) C.G.Rice : Investigation of the trade-off effects of aircraft noise and number. J.Sound Vib., 52(3) (1977) p.325
- 25) 西宮 元 : 環境騒音評価に関する国際動向 (ISO/R1996 の見直しについて), 音響学会誌 34(2) (1978) p.94
- 26) K.Matschat, E.A.Müller, and G.Zimmermann : On the formulation of noise indices, Acustica, 37 (1977) p.267

注) ICAO では、純音補正した PNL の各時点での値 $PNLT(k)$ の最大値を $PNLTM$ とし、

$$D = 10 \log_{10} \left\{ \sum_{k=0}^{2d} \text{antilog} [PNLT(k)/10] \right\} - PNLTM - 13$$

で表わした継続時間補正量 D を $PNLTM$ に加えて $EPNL$ を定義している。すなわち

$$EPNL = PNLTM + D$$

ただし、 d は、 $PNLTM \geq 100$ TPN(dB) のとき $PNLTM$ から 10 dB 降下した継続時間であり、 $90 \leq PNLTM < 100$ の時、 $PNLTM \geq 90$ となる継続時間をとる。又、 $PNLTM < 90$ の時は $D = 0$ とする。

第2章 研究の方法に関する 二、三の考察

第2章 研究の方法に関する 二、三の考察

1 研究方法

本研究では、実験室内の聴取実験によって研究を行った。

聴取実験では、刺激音のパラメータを種々に変化させることができ、また被検者の反応を精度よく測定できるので、この方法によれば両者の関係を詳細に検討することができる。一方、この方法では、被検者が構えて反応すること、刺激音の継続時間を十分長くとることができないこと等の短所があり、現実の騒音環境との対応がどれほどあるのかという点に問題が残る。

現実の騒音環境における研究方法としては、社会調査的手法により住民反応を測定し、騒音環境との対応を求めるという方法がある。この場合には逆に、住民反応の測定精度が悪いこと、その結果の普遍性に疑問があること、刺激音の物理性状の変化域が限定されること等の難点がある。

社会調査手法による研究と聴取実験による研究とを結びつけることは重要な課題であり、既に試みられてもいる¹⁾が、本研究では、その目的に鑑みて、聴取実験による方法を採用する。

2 ラウドネスとうるささ

実験室内における聴取実験において、何を測定するのか、ということがまず問題となる。特に、ラウドネス (loudness)、やかましさ (noisiness)、うるささ (annoyance) はそれぞれ異なる概念であるとする主張²⁾もあるので、この点について筆者の立場を述べる。

Laird et al.³⁾ は既に1929年に、アノイアンスをピッチとラウドネスとの関連で測定しているが、perceived noisiness について最も精力的な研究を行った Kryter は、ラウドネスはその性質上、継続時間の長い音については特に主観的評価としての不備が生じる⁴⁾とし、ノイジネスを測定することを実験の目的とした。更に彼は、ラウドネスよりノイジネスの方が判定し易く⁵⁾、複雑な刺激音ではラウドネスとノイジネスとは差が生じる⁶⁾として、両者をはっきり区別すべきであると主張した。

これに対し、S.S.Stevens は Kryter の perceived noisiness に対して強い疑義を表明し⁷⁾、通常人にとっては noisy や acceptable より loud の方がわかりやすい

こと、諸家の結果の比較を行ってもラウドネスとノイジネスとで周波数特性による差が少ないこと、及び継続時間の効果、回数の効果はラウドネスに対しても独立した変数として導入できることを理由に perceived noisiness を厳しく批判した⁸⁾。更に彼は、ラウドネス及びノイジネスを含んだ形で騒音の心理量を perceived magnitude と呼び、Perceived Level (PL dB) を提唱した⁹⁾。

こういった論争に関し、4章で記述するうるささと継続時間の関係に関する研究者らは、アノイアンス又はノイジネスとラウドネスとを区別する立場にあると言ってよい。一方、これに対し、教示と評価値との関連性を検討した実験結果によると、noisy と loud は同義語であり、この両者と acceptable とは区別があったとする報告¹⁰⁾とか、うるささ (Lästigkeit) を操作的に定義しようとする試み¹¹⁾もなされているが、現在「うるささ」と「大きさ」を区別するのは主として教示によっている。したがって当然 Zwicker¹²⁾ の言うように、この種の問題では語義論が必要であろう。とすれば loudness (Lautstärke, 大きさ)、あるいは annoyance (Lästigkeit, うるささ) の概念が諸国民によってその母国語との関連において、必ずしも一致しない以上、上記の研究結果を我々が参考にするには自ら限度がある。

ここで筆者が今回の実験で被検者に対して、「うるささ」を判定するように教示した点に関して、筆者の見解を述べておきたい。すなわち、筆者は「大きさ」と「うるささ」を峻別することは困難であると考えており、ラウドネスはノイジネスの一要素であるといった見解¹³⁾は採らない。また、筆者は前述した S.S.Stevens の見解を原則的には容認し、perceived magnitude を測定することを目的としているが、duration effect が level-dependent である可能性が認められるので、S.S.Stevens の主張するように継続時間等の効果が独立に導入できるとする見解に対しては疑義を有している。ただ、perceived magnitude を測定する場合、「大きさ」より「うるささ」と言う方が被検者にとって測定内容が理解しやすいのではないかと考えている。

3 マグニチュード評価法

うるささの測定は、原則としてマグニチュード評価法 (method of magnitude estimation) によって行った。

マグニチュード評価法は、S.S.Stevens によって開発された心理測定法で、比率尺度の直接構成に用いられる。その具体的な手法には種々の変法があるが、最も進んだ方法は modulus のない場合のマグニチュード評価法である。(modulus とは、特定の標準刺激をあらかじめ呈示して、これに特

定の数値を実験者が指定する際の、その数値をいう。)この場合は、被検者は、次々と呈示される一連の刺激に対して、心理量に比例した全く自由な数値を付与し、実験者は、得られた数値の相対的な比の値をデータとして用いる、というものである。¹⁴⁾

人の心は直接測ることはできず、ただ大小の判断ができるのみである、と心理学者が考えていた時代に、物理学者や技術者によってマグニチュード評価法の萌芽的研究が行われた。^{15)~18)} 1930年代の後半になって、S.S.Stevens¹⁹⁾が、この方法によって loudness 等の尺度構成を行って以来、心理測定法としてその是非が種々論ぜられた。²⁰⁾ S.S.Stevens 自身も、その方法を用いる際の bias について詳細に研究し、その成果に基づいて、modulus の無いマグニチュード評価法を 1956年に完成させた。²¹⁾

マグニチュード評価法は、基本的に刺激と感覚とはベキ関数の関係にあるという、「ベキ法則」に関連している。即ち、マグニチュード評価法によって被検者が言語報告として表出した数詞を、そのまま数値として扱って、それと刺激の値との関係を求めれば、そこには一般にベキ関数が第1次近似として適合する。いま、マグニチュード評価値を ψ 、刺激強度を ϕ とすると、

$$\psi = k \phi^{\alpha} \quad (k, \alpha; \text{const.}) \quad (1)$$

という式で表わされる。¹⁴⁾

しかし、この関数の適合性はどれほど一般的であるのかという問題は、同時にマグニチュード評価法の感覚測定法としての妥当性に直接関連する。マグニチュード評価に影響する諸要因については、かなり詳しく調べられており、次の6種の要因が指摘されている。²²⁾

a. 刺激の変域

刺激の変域が広がるとベキの値が小さくなる。

b. 閾値からのへだたり

閾値に近い部分でベキの値が大きくなる。

c. 標準刺激の位置

modulus を用いる場合に、標準となる刺激が評価される刺激の変域の上端又は下端に近いときには、中ほどのときに比べて、ベキの値が小さくなる。

d. 最初に与えられる刺激と標準刺激とのへだたり

ある標準刺激と modulus とがきめられていると

き、最初に呈示される刺激とそれに対する評価の仕方とが、後の評価に影響する。

e. 数詞の利用可能性

標準刺激より小さい値の刺激に対して用いられる数詞は、標準刺激より大きい値の刺激に対して用いられる数詞より、利用可能性が限定されやすい。

f. modulus の大きさ

modulus の値が高い場合には、それより低い評価に利用可能な数詞の範囲が広いと、ベキの値が大きくなり、modulus の値が低い場合には逆にベキの値は小さくなる。

この他に、刺激の呈示に関する要因とは異なるが、ベキの値に影響する要因の一つに、課題の困難さが指摘されている。²³⁾ 即ち、課題が困難であるほどベキの値は小さいと。さらに、マグニチュード評価法とマグニチュード表出法 (method of magnitude production) とでは、前者の場合にベキの値が小さい。²⁴⁾ マグニチュード表出法というのは、実験者が被検者に数値を与えて、被検者がそれに対応すると思う刺激強度を作る方法である。マグニチュード評価法にせよ、マグニチュード表出法にせよ、数感覚と刺激による感覚との異種感覚相間のマッチング (cross-modality matching) を行なっているのであるから、両方法によってベキの値が異なるのは、マッチング実験において一般に認められている回帰効果であると解されている。従って、より正しいベキの値は、両方法を併用して、回帰効果を相殺することによって得られると考えられる。

なお、マグニチュード評価に影響する諸要因として掲げた上記6要因のうち、c~fについては、modulus を用いない場合には問題にならないか、影響が大巾に減少すると考えてよい。b. の要因についても、ラウドネスの場合は、閾値から 20~30 dB 以上へだたれば無視し得る。

ベキ法則の妥当性は、マグニチュード評価法の妥当性とも密接に関連していることではあるが、それを詳しく議論することは、本研究において、主たる興味を有するものではない。ベキ法則に対する主要な批判は、被検者の評価した数値が、そのまま公共的なデータとして、既存の数体系を有する保証はないとするものである²⁵⁾が、被検者の報告する数詞をそのまま数値として取扱って、それを刺激の値に対してプロットすれば、ベキ関数

が、少くとも最も平均的な法則として、第1次近似的に適合するというのは事実である。従って、本研究においては、ベキ法則が成立するという前提に立って議論を進めることにする。(ベキ法則の妥当性に関する議論については成書^{25) 26)}に譲る。)

ベキ法則の妥当性とマグニチュード評価法の適用可能性については、なお議論の余地があるにしても、心理測定法としてのマグニチュード評価法は大きな長所をもっている。それは、方法が簡単であること、再現性がよいこと、刺激の効果に対する全体的判断が行ない易いこと、単位時間当りに得られる情報が多いこと、実験結果に影響を与える可能性のある要因が詳しく調べられていること、等である。特に本研究においては、マグニチュード評価法をPSE(主観点等価点)の決定のために主として用いており、この目的のために使うという限りにおいては、この方法は十分適用が可能であると考えられる。

4 三角形状騒音の尺度構成

マグニチュード評価法の最も進んだ形は、一連の刺激に対して、任意の数を付与してゆく方法であるが、この方法では、実験に用いる刺激が同時期に入手できることが必要である。しかし、現場の騒音を用いて研究を行ったり、刺激の物理的パラメータを前の実験成績に応じて、変えるような場合には、却って都合の悪いこともある。このような場合には、基準音を用いて、これと対象とする騒音との一対比較実験を行うことによって基準音のレベルで表わしたPSEを測定することができる。本節では基準音として三角形状騒音を選定することとし、そのうるさを比率尺度構成することを試みる。

4.1. 比例表出法(分数法)による実験

比例表出法²⁷⁾(method of ratio production)は、マグニチュード評価法とは逆のような関係にある方法である。実験者が標準刺激 ϕ_0 を被検者に呈示する。被検者には ϕ_0 に対応する心理量 ψ_0 に対して

$$k_i \psi_0 = \psi_i \quad (2)$$

$$k_i : \text{const.} (i = 1, 2, \dots)$$

となるような心理量 ψ_i をもたらす刺激強度 ϕ_i を作るよう求める。すなわち、心理量の系列 $\{\psi_i, i = 1, 2, \dots\}$ に対応する物理量の系列 $\{\phi_i, i = 1, 2, \dots\}$ を作成する。

比例表出法の定数 k_i を分数に指定した場合を分数法(fractionation method)といい、 k_i を整数に指定した場合を倍数法(multiplication method)という。

4.1.1. 実験方法

1) 装置および刺激音

基準音は、Fig. 1に示すようなレベル変動をする白色騒音であり、その立上りおよび立下り速度は5 dB/sである。基準音として、Fig. 1に示したような三角形状騒音を選定した理由は、(1)被検者にとって印象が模擬騒音および新幹線騒音と著しく異ならないこと、(2)レベルの急激な変化を伴わないこと(3)ピークが被検者にとって明確には把握し難いこと、(4)他の報告との比較が可能であること、である。(4)に関しては香野ら²⁸⁾の鉄道騒音のうるささに関する報告があり、その実験で用いられた基準音のレベル変動パターンと今回の実験で用いたものとは一致している。

使用した機器のブロックダイアグラムをFig. 2に示した。sine random generator(Brüel & Kjær, 1024)で発生させた白色騒音のレベルを模擬騒音発生装置²⁹⁾(Noise Simulator, リオン)で変化させてFig. 1に示したレベル変動をする騒音を発生させテープレコーダー(TEAC, R-310)で磁気テープに録音する。実験時には所定の手続きに従って、テープレコーダーにより再生した騒音を防音室内(実験時の室内暗騒音25 dBA以下)の被検者の両耳にヘッドホン(STAX, SR-X)で提示した。提示する音のレベルは減衰器(菊水電子, 984A)で設定した。騒音のレベルの測定および周波数分析は、人工耳(Brüel & Kjær, 4153)、精密騒音計(Brüel & Kjær, 2203)およびユニバーサルフィルター(JEIC, UF-4)を用いて行なった。Fig. 3に騒音の1/3オクターブバンド分析の結果を示した。また、実験中に被検者に提示している音のレベルを監視するために、レベルレコーダー(Brüel & Kjær, 2305)を用いた。

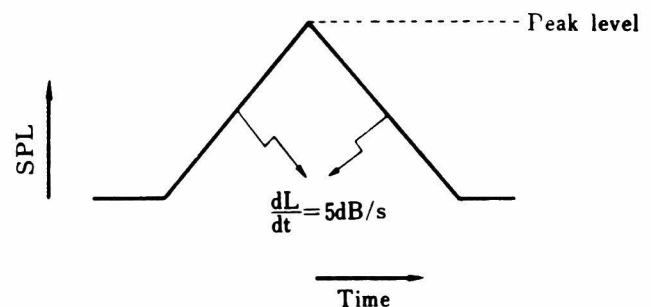


Fig. 1 Time pattern of the standard sound (white noise).

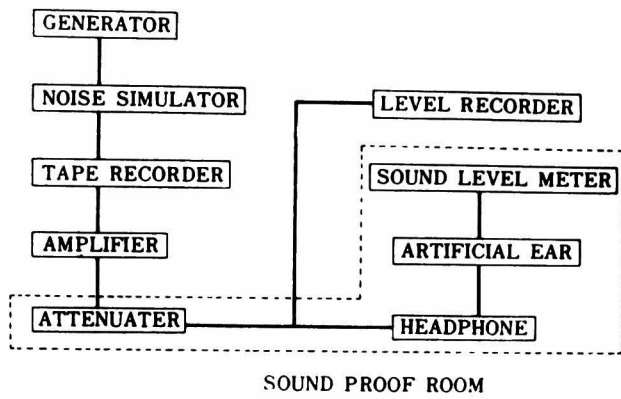


Fig. 2 Block-diagram of the instruments used in the experiment.

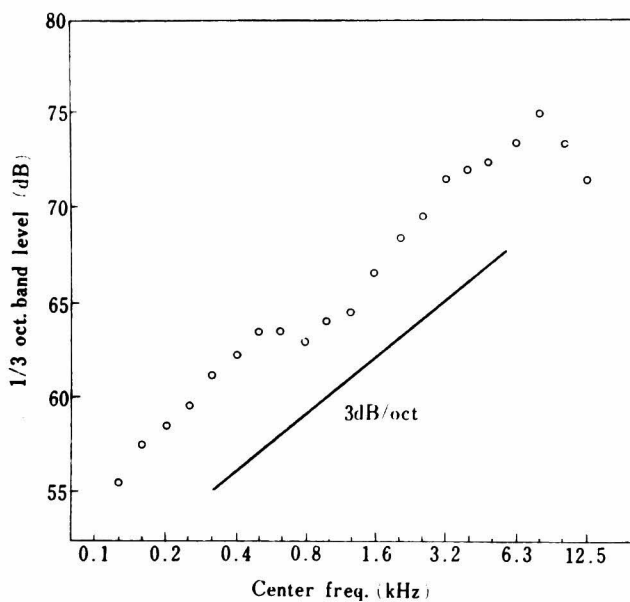


Fig. 3 Results of 1/3 octave band analysis of the stimulus sound (Over-all = 80 dBC).

模擬騒音発生装置²⁹⁾は、Fig. 4 に示す外観を有し、装置のブロック図は Fig. 5 に示されている。

本装置は、入力信号のレベルを、sweep generator の出力電圧に、比例して変化させ、出力する装置である。Sweep generator (EXACT 7060) は、矩形波、正弦波、三角波、鋸歯状波を発生する。この波形を、波形変形回路、およびスライス回路で変化させることにより、種々の波形を作製することができる。例えば、三角波の場合であれば、波形変形回路によって、sweep generator で発生した二等辺三角形の形を歪ませて、任意の三角形とし（但し、底角を 90° 以上とすることはできない。）、スライス回路によって三角形の一部を切断して台形にすることができる。このような種々の波形を模擬

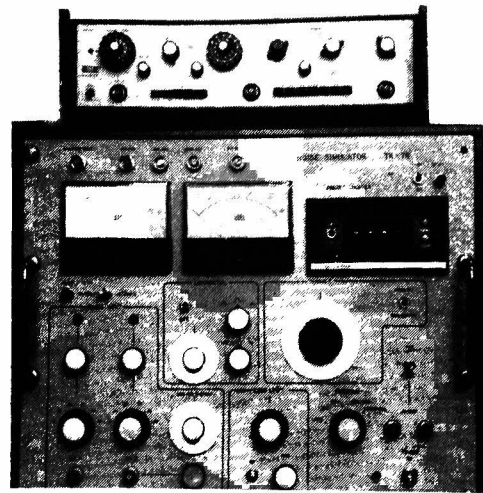


Fig. 4 Noise Simulator.

The amplitude of input signal is modulated by the instrument according to antilogarithm of the output voltage of the function generator.

波形と呼ぶ。模擬波形を、逆対数変換回路、およびレベル制御回路（振幅変調回路）において対数的に変化させる。所定の信号（Signal 1）を、レベル制御回路に搬送波として入力すると、出力信号はそのレベルが模擬波形になる。この装置は心理実験用に設計されているので、異なる信号の一対比較をすることができるように、スイッチ回路に任意信号（Signal 2）を別に入力すれば、交互に出力できる。又、模擬波形となる騒音（模擬騒音）を必要な回数だけ繰返し、発生させることも可能である。スイッチ回路の後にはゲート回路があり、この回路のスイッチを ON にすることによって、模擬騒音が発生しない時間（off-time）中に暗騒音を出すことができる。

総合的な性能としては、波形継続時間：0.1 ~ 100 秒、レベル変化範囲：約 50 dB、レベル変化の直線性： ± 1 dB が得られている。

2) 実験手続き

実験は調整法によった。被検者には、甲乙一対の基準音を繰返して提示し、甲の基準音のレベルは固定しておく。被検者は手元の減衰器を用いて乙の基準音のレベルを調整し、乙の基準音のうるささが甲の基準音のうるささの $1/2$ になるようにする。下降系列の場合は、甲のレ

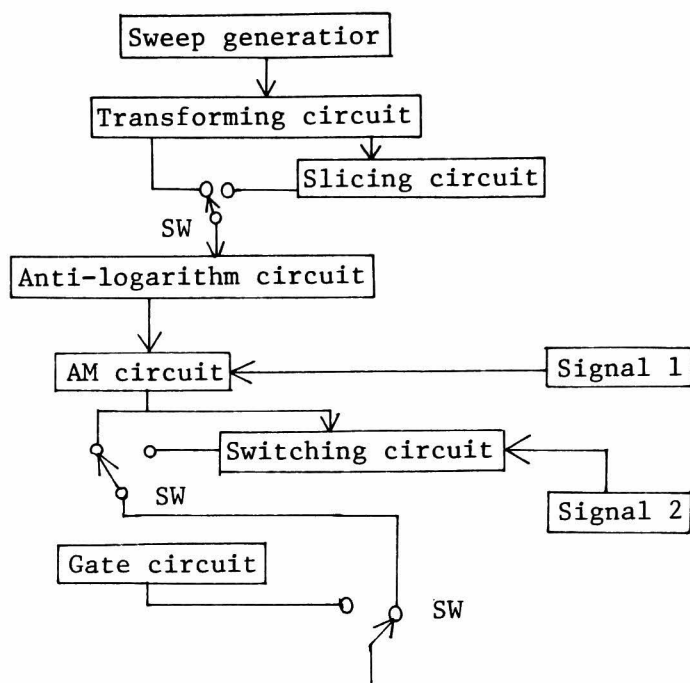


Fig. 5 Blockdiagram of Noise Simulator

ベルに等しい点を、また上昇系列の場合は、甲のレベルより25 dB 低い点を出発点として乙のレベルを調整させた。刺激音は被検者が望む限り提示したが、10回以上繰返しても判定できないときは系列の最初から実験をやり直した。

甲の基準音のピークレベルは、50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90 dBA の9種類を選定した。

3) 被検者

健康で聴力正常な青年男子(年齢19~28歳)8名を選定して被検者とした。うるさは、たんに音の大小だけでなく全体的な感じで判定するよう指示した。また、本実験に入る前に数回の練習を行なって、実験手続きに習熟するようにした。

4.1.2 実験結果および考察

各被検者の上昇系列および下降系列の成績の平均値をその被検者の成績とし、8人の平均値を実験成績としてFig. 6にプロットした。Fig. 6の横軸は甲の音のピークレベルであり、縦軸はうるさが甲の1/2と判定された乙の音のピークレベルである。むろん、甲乙ともに同じレベル変動パターン(Fig. 1)を有する音(基準音)であるので、図中に引いた点線上では両者のうるさは等しい。実線は実験結果に最小自乗法であてはめた直線であり、その傾きは1.00である。また横軸の値が70 dBAのとき実線上の値は61.0 dBAとなっており、実線は点線から9.0 dB隔って点線に平行な直線となっている。こ

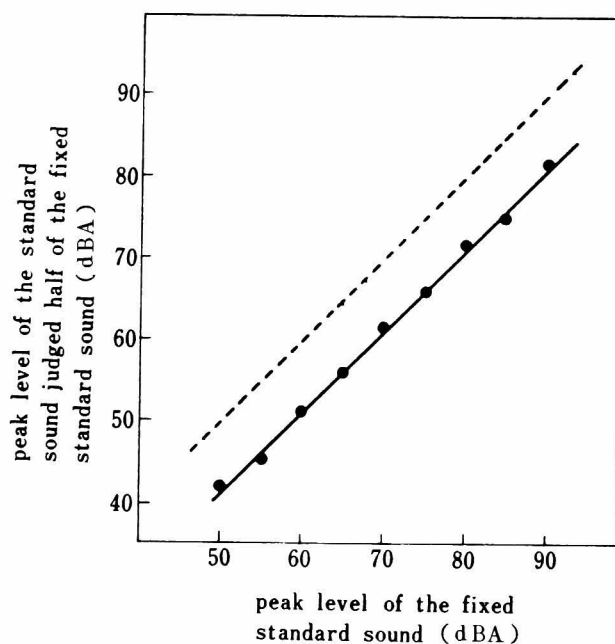


Fig. 6 Results of the fractionation experiment of triangular noise.

れより、今回用いた基準音は、そのピークレベルが9 dB増加すれば、うるさが2倍に感じられるといえる。

これに関して、現在ISO³⁰⁾で採用されているStevensのloudness level(単位はphon)の計算法(MKVI)の場合

には、10 dB のレベルの増加に対して大きさが2倍になるという関係が採用されており、同じくISO³¹⁾で採用されているKryter の Perceived Noise Level (単位は PNdB) の場合には、10 dB のレベルの増加に対して、うるさが2倍になるという関係が採用されている。しかし、騒音のうるささと大きさとの両者を総合した dB 尺度による新しい評価方法として Stevens³²⁾ が提唱した Perceived Level (単位は PLdB) の計算方法 (MK VII) においては9 dBのレベルの増加に対して“知覚の大きさ” (perceived magnitude) が2倍になるという関係が採用されているのであって、今回の実験成績はこの関係と一致するものである。

以上の実験結果を用いて、基準音の尺度構成をつぎのようにして行なった。

香野²⁸⁾は暴露される騒音の音響エネルギーの dB 表示として Len を次式で定義している。

$$L_{en}(\ast) = 10 \log_{10} \int_0^T 10^{L(\ast)/10} dt \quad (3)$$

ここに、 \ast は A, C, D 等の聴感補正に関するウェイト、 $L(\ast)$ は時刻 t における騒音レベル、 T は騒音の全持続時間 (s) である。

いま、ピークレベル80 dBA の基準音の Len を (3) 式に従って計算すると、82.4 dBA となる (これは基準音と等しい音響エネルギーを有する継続時間1 s の矩形騒音の音圧レベルとみなすことができる)。このとき、MK VII³²⁾によって perceived magnitude (単位、sone) を計算すると80.0 sone となり、Len は88.9 PLdB となる。ゆえに、ピークレベル80 dBA の基準音は80 sone となるが、この導出においては三角形騒音と継続時間1 s の矩形騒音とはエネルギーを等しくするので、うるささも等しいという仮定を先験的に認めている。しかし、現段階ではピークレベル80 dBA の基準音が80.0 sone であるとするのは妥当ではないので、われわれはこれを80.0 May と呼び変えることにした。May という比率尺度の単位名は、日本語の「五月蠅」に由来する。呼称のほかは MK VII³²⁾に提案されている関係を採用すれば、基準音のピークレベル L_p (dBA) と May の値との関係は、

$$L_p + 9 = 32 + 29.9 \log_{10} M \quad (4)$$

で表わされる。ただし、 M は前述のうるささのマグニチュード (単位は May) である。

このようにして基準音の尺度構成が行なわれると、その周波数構成にかかわらず、レベル変動パターンだけが基準音を特徴づける物理特性となる。さらに、任意の周波数構成、レベル変動パターンを有する騒音がある場合、当該騒音のうるささに等価な基準音、すなわち主観的等価点 (PSE; Point of Subjective Equality) を測定することにより、当該騒音はうるささに関する比率尺度上のどこに位置するかが知られることとなる。

4.2 等分割法による実験

刺激強度 ϕ_i と ϕ_j とによって生じた心理量 ψ_i, ψ_j の間を距離が等しくなるように n 個の間隔に分割し、 ψ_k ($k = 1, 2, \dots, n-1$) の心理量に対応する ($n-1$) 個の刺激強度 ϕ_k ($k = 1, 2, \dots, n-1$) を求める方法を等分割法 (equisection method) という。

本節では、基準音の間隔尺度構成を試みる。

4.2.1 実験方法

1) 装置および刺激音

4.1.1.1) に記載した通りである。

2) 実験手続

標準刺激として、70 dBA と 80 dBA の刺激音を設定する。これをそれぞれ ϕ_1, ϕ_2 とする。 ϕ_1 と ϕ_2 の間に ϕ_3 を配置し、 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 の心理量を、 ψ_1, ψ_2, ψ_3 としたとき、 $(\psi_2 - \psi_3) = (\psi_3 - \psi_1)$ となるように ϕ_3 のレベルを定める。そのために、 ϕ_3 のレベルを 73 dBA から 78 dBA まで 1 dB ステップで 6 個作り、その各々のレベルの ϕ_3 を用いて、 $\phi_1 \rightarrow \phi_3 \rightarrow \phi_2$ の順で被検者に呈示した。 $(\psi_2 - \psi_3)$ と $(\psi_3 - \psi_1)$ との大小、即ち差の大小を判定する。但し等判断を許す。また、逆に $\phi_3 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_1$ の順でも呈示して、同様の判定を行なわせた。結局、各被検者は12回の判定を行なった。この成績に基づいて、後述する方法によって、 $(\psi_2 - \hat{\psi}_3) = (\hat{\psi}_3 - \psi_1)$ となる時の $\hat{\psi}_3$ に対応する $\hat{\phi}_3$ を定める。(ここで \wedge の記号は実験によって等分点と定められた時の値を意味する。以下同様。) この関係を Fig. 7 に示す。

つぎに $\phi_2, \hat{\phi}_3$ を標準刺激として、 ϕ_2 よりレベルの高い刺激 ϕ_4 のレベルを、 $\hat{\psi}_4 - \psi_2 = \psi_2 - \hat{\psi}_3$ となるように定める。この場合は、 ϕ_4 のレベルは 81~86 dBA の範囲で 1 dB ステップで変化させ、 $\phi_4 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_3$ 及び $\phi_3 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_4$ の順序で被検者に呈示した。被検者には前と同様の判定を求める。

同様にして、 $\hat{\phi}_5$ を ϕ_1 と $\hat{\phi}_3$ とから、 $\hat{\phi}_6$ を ϕ_1 と ϕ_2 とから求める。但し、 ϕ_5 は 61~66 dBA、又 ϕ_6 は 83~88 dB の範囲で 1 dB ステップに変化させた。

3) 被検者

4.1.1.3) に記載した被検者と同一である。

4.2.2 実験結果及び考察

例として、 $\hat{\phi}_5$ を定める場合をとりあげて、結

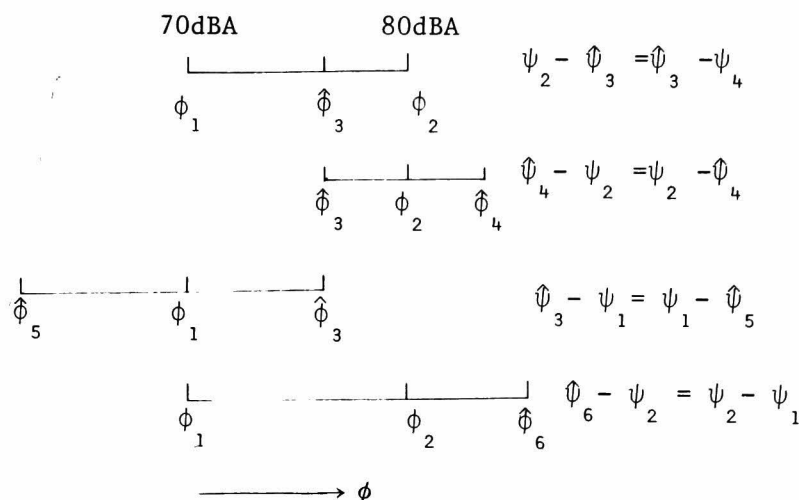


Fig. 7 A description of the experimental method of equisection.

果の整理方法を説明する。

ϕ_5 の場合は, 61~66 dBAまで 1 dBステップでレベルが変化した。この各々のレベルに対して, 8名の各被検者は $\hat{\phi}_3 \rightarrow \phi_1 \rightarrow \phi_5$ と $\phi_5 \rightarrow \phi_1 \rightarrow \hat{\phi}_3$ の両順で判定しているから, 合計16個の成績が得られている。今, $\hat{\psi}_3 - \psi_1 < \psi_1 - \psi_5$ の時, すなわち, ψ_1 が $\hat{\psi}_3$ と ψ_5 の2分点より大である時は, 1を, $\hat{\psi}_3 - \psi_1 = \psi_1 - \psi_5$ の時は0.5を, $\hat{\psi}_3 - \psi_1 > \psi_1 - \psi_5$ の時は0を付与して, 16個のデータの平均を求めると, この値はそのレベルの ϕ_5 を用いた時に, ψ_1 が2分点より大きいと判断される率を表わすとみなし得る。恒常法のデータ処理で通常行われるように, この平均値を, ϕ_5 のレベルを横軸にとって, 正規確率紙上にプロットしたのが Fig. 8である。図中の直線は回帰直線を示す。この直線から, 平均値が0.5となる時の $\hat{\phi}_5$ のレベルを求めると, その $\hat{\phi}_5$ は $\hat{\psi}_3 - \psi_1 = \psi_1 - \psi_5$ となる時のレベルである。同様にして, $\hat{\phi}_3, \hat{\phi}_4, \hat{\phi}_6$ を求めた。

今, 仮に ψ_1 と ψ_2 の距離を2とすると, $\hat{\psi}_5, \psi_1, \hat{\psi}_3, \psi_2, \hat{\psi}_4, \hat{\psi}_6$ の距離はこの順で距離が1となり, 心理的に等間隔な6個の刺激が得られたことがわかる。Fig. 9では横軸に刺激の距離をとり, 縦軸に刺激音のレベルをとって, データをプロットした。この関係が基準音の間隔尺度を示している。

4.3. 修正比例法 (method of corrected ratios) による検討

Garner³³⁾ は, マグニチュード評価法やマグニチ

ュード表出法によって, 比率尺度を構成する方法を批判した。例えば, 4.1.の比例表出法では, 被検者に $1/2$ と判断してレベルを調整するよう求めているが, この値が真に $1/2$ となっているかどうか疑問が残るとしている。

Garner 自身の提案する修正比例法は, 固定した刺激 ϕ_1, ϕ_2 と変化刺激 ϕ_3 がある時, その心理量 ψ_1, ψ_2, ψ_3 が, $\psi_1/\psi_2 = \psi_2/\psi_3$ となるように ϕ_3 を定める実験と, 等分割法とから比率尺度を構成する方法とである。

今, 真のうるささ M とすると, 比例判断の場合は,

$$M = A \cdot B^X \quad (5)$$

と表わされる。ただし, B は比の値で, Garner は予め定めない。 A は任意定数, X はべきである。又, 等間隔判定の場合は,

$$M = C(Y - D) \quad (6)$$

と表わされる。ただし, Y は等間隔関数の値, D はゼロ点, C は任意定数である。

今, 式(5)と(6)の両辺の対数をとると,

$$\begin{aligned} \log M &= X \cdot \log B + \log A \\ &= \log(Y - D) + \log C \end{aligned} \quad (7)$$

よって

$$\log(Y - D) = (\log B) X + \log \frac{A}{C} \quad (8)$$

式(8)から $\log(Y - D)$ と X とは線型関係にあり, その傾きから B の値を決定し得ることがわかる。

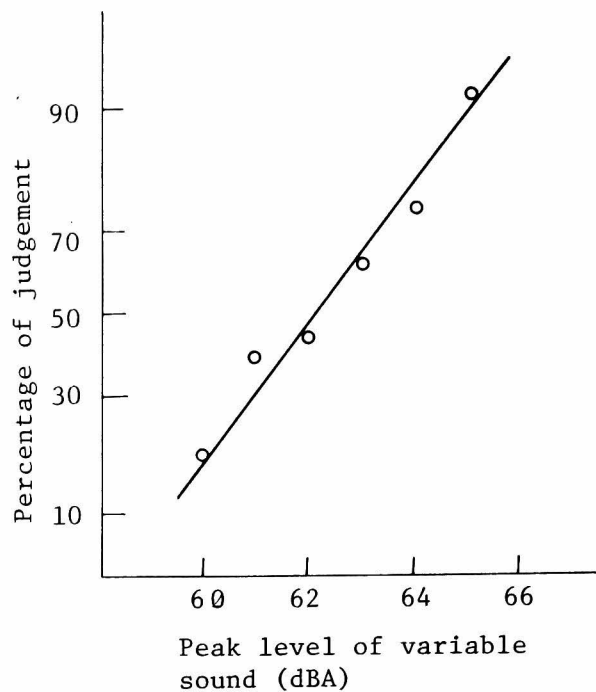


Fig. 8 An example of the relation between the percentage of judgement that the variable sound is above the equisection point.
The variable sound is ϕ_5 in this case.

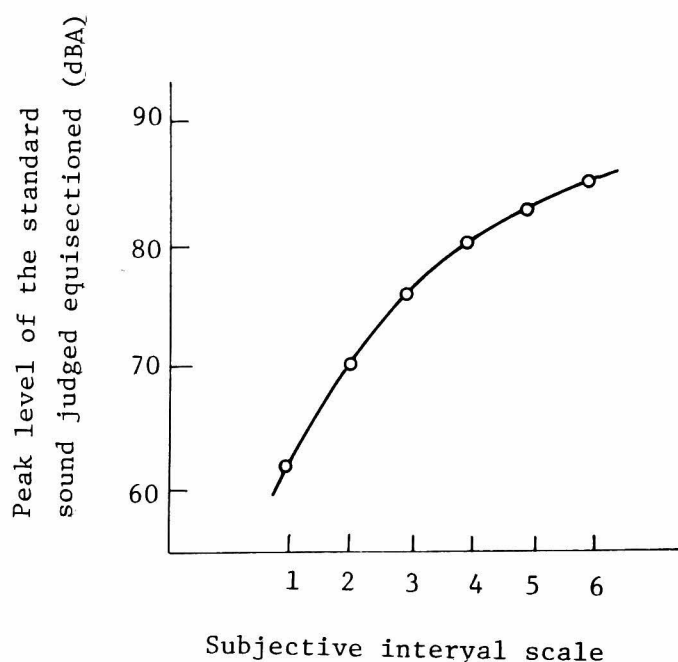


Fig. 9 Results of the equisection experiment of the standard sound.

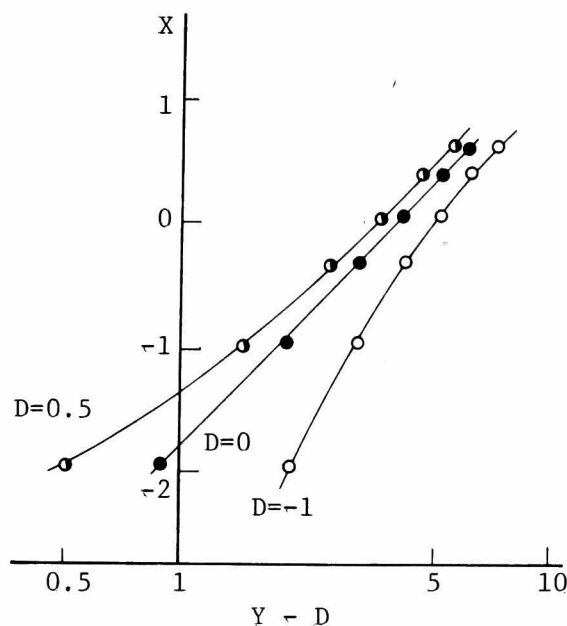


Fig. 10 Relation between $\log(Y-D)$ and X for some values of D .
A particular value of D makes the relation linear.

ゼロ点 D の値は決められていないから、 $\log(Y-D)$ と X とが線型になるように、 D の値を決めなければならない。

X の値は相対値を定めれば足りるから、今、基準音のピークレベルが 75 dB の時の X を 0 とする。
4. 1. で得た成績から 9 dB ピークレベルが下がると、うるさがりが $1/B$ (実験では $1/2$ と教示したが、この値を今は疑っているの、 $1/B$ とする。) となることが知られているから、

$$X = (PL - 75) / 9 \quad (9)$$

となる。ただし、 PL は基準音のピークレベル。

Fig. 10 には、 $D = -1, 0, 0.5$ とした時の $\log(Y-D)$ と X との関係プロットした。Table 1 には、 $D = -1, -0.1, 0, 0.1, 0.5$ の場合の回帰直線の相関係数 r と B の値とを記した。Fig. 10 からは $D = 0$ 付近で X と $\log(Y-D)$ が線型関係になることが知られる。 $D = 0$ 付近では、 $D = -0.1 \sim 0.1$ の間で相関係数に大きな変化はないので、 $D = 0$ で X と $\log(Y-D)$ とが線型になるとみなすことにする。 $D = 0$ の時の直線の傾きから、 B の値を求めると、1.99 であった。このことから、4. 1. の実験では、被検者は $1/2$ の判定をほぼ正確に行っていたことが明らかとなった。従って、この点に関する Garner の疑問は当たらない。また、この事実は、マグニチュード評価法等の比率尺度構

成法について、その信頼性を支持するとともに、三角形騒音のような変動騒音においても、被検者は比例判断ができることを示している。

Table 1 Correlation coefficients (r) and ratios (B) for some values of D in equation (8).

D	-1.0	-0.1	0.0	0.1	0.5
r	0.998	0.999	0.999	0.998	0.996
B	1.62	1.93	1.99	2.06	2.64

4. 4. 一対比較マグニチュード評価法による PSE の決定方法

台形状騒音を刺激音として、一対比較マグニチュード評価法によって基準音の PSE を求める方法を述べる。

4. 4. 1. 実験方法

1) 装置及び刺激音

装置は 4. 1 で用いた装置を用いた。

刺激音として、白色騒音で台形状騒音 (時間的なレベル変動のパターンが台形状を呈する騒音) を作製した。台形状騒音は Fig 11 に示すように、立上り速度と立下り速度を基準音のそれと同じく、5 dB/s とした。ピークの継続時間は 1, 2, 4,

8 sとし、その各々についてピークレベルを 65, 73, 80 dBAとした。刺激音の物理性状を Table 2 に記す。

Table 2 Some physical characteristics of stimulus sounds used in the experiment in the section 4.4.

Peak level (dBA)	65, 73, 80
Peak duration (s)	1, 2, 4, 8
Rising speed (dB/s)	5

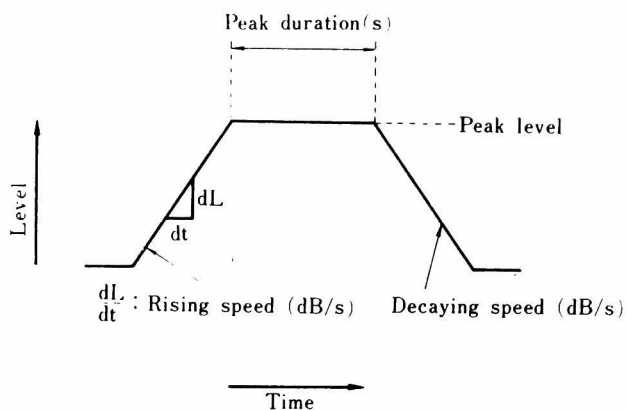


Fig. 11 An idealized time pattern of the level change of trapezoidal noise (white noise).

2) 実験手続き

模擬騒音ならびに新幹線騒音と、うるささの等価な基準音のピークレベルを試聴によって検者が見当をつけておき、その前後のレベル範囲に3または4 dBステップで6段階の基準音レベルをあらかじめ選定した。こうして選定した6つの基準音と1つの模擬騒音または新幹線騒音とを提示順序をランダムにして被検者に対比較を行なわせた。被検者は一對の刺激音のうち最初に聴いた方に任意の点数を与え、つぎに聴いた音のうるささが前の何倍になっているかを判定して相応する点数を与える。数値は比の値のみが意味を有することをよく説明した。

1つの模擬騒音または新幹線騒音に関して、各被検者ごとに6つの基準音を比較しているので、計48回の判定で模擬騒音または新幹線騒音のうるささに等価な基準音のレベル (PSE) を決定することとなる。

3) 被検者

被検者は4.1の実験で用いた被検者と同じである。後述するように、当実験はマグニチュード評価法によって行なわれているので、被検者が比の感覚や点数のつけ方の要領になれるように、つぎのような練習を行なわせた。すなわち、ある範囲内の線分の物理的長さの主観的長さは、ほぼ線型の関係にあるという知見³⁴⁾を利用して、まず4~36 cmの範囲の線分を10数種作製しておき、一對

の線分にそれぞれ点数を与えて長さの比に点数の比が等しくなるように評点させ、あるいは、これらの線分群から長さの比が1/2等となるような線分の組を選択させるといった練習を行なった。被検者には、この実験がうるささの実験であること、うるささには継続時間の要素も含まれていることを説明した。継続時間の要素を説明するかどうか、いわゆる duration cue があるかどうかでうるささの判定において継続時間の効果が異なるという報告³⁵⁾がある。今回 duration cueを与えたのは、かりにそれを与えなかったとしても、被検者のなかには継続時間の効果を意識する人がいると考えられ、かえって意識しない人との間に判断の不統一が起こればと考えたためである。

4.4.2 実験結果および考察

8人の被検者によって与えられた比の値を幾何平均し、基準音のピークレベルに対してプロットしたのが Fig. 12 である。Fig. 12 は立上りおよび立下り速度が 5 dB/s、ピークの継続時間 4 s、ピークレベル 73 dBA の台形状騒音に関して得られた成績である。図では、下の横軸に基準音のピークレベル (dBA) を、上の横軸には (4) 式により求めた May をとってある。また、縦軸はう

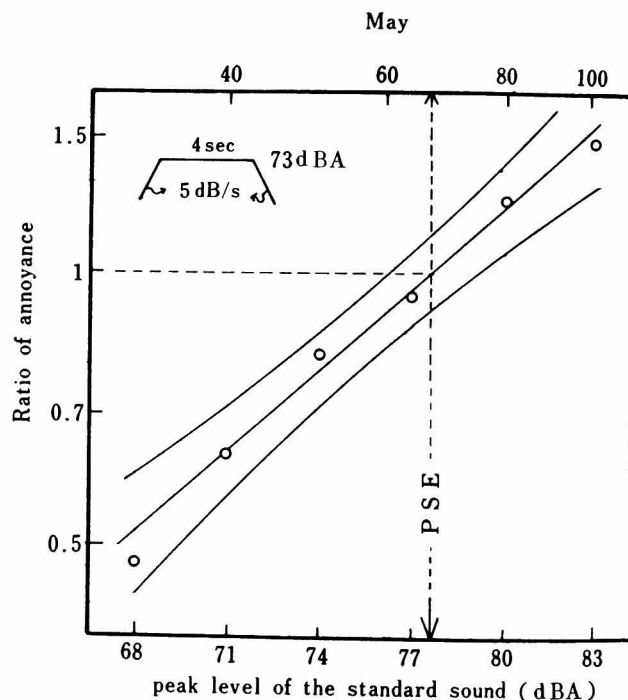


Fig. 12 Relation between the peak level of the standard sound and the ratio of annoyance (ψ) for a trapezoidal noise. The line and the curves show the regression line and its 95 per cent confidence limits. The value of May is determined from the equation (4).

るささの比である。図からわかるように、 ψ の対数は基準音のピークレベルに関して直線的に増加している。図中に引いた直線は最小自乗法であてはめた回帰直線であり、曲線はその95%信頼限界である。この回帰直線より、 $\psi = 1$ となる基準音のピークレベルを求めると、それが台形状騒音のうるささに等価な基準音のピークレベルである。同様に、台形状騒音の M_{ay} が決定できる。

ここで得られた他の刺激音に関する成績は次節で記載する。

4.5 調整法による結果との比較

PSE の決定において、よく用いられる方法の1つに調整法がある。実際、香野ら²⁸⁾もこの方法によって今回の実験と同様な実験を行なっている。

マグニチュード評価法のように、提示されるおのこの騒音のうるささに評点する方法と、調整法のように、提示される2つの音のうるさが等しくなるように自ら調整する方法とでは、実験結果に差が生ずるとも考えられるので、この点を検討するため、模擬騒音のうるささに等価な基準音のレベルを調整法で測定し、前節の結果と比較する。

4.5.1 実験方法

1) 装置および刺激音

実験装置等は4.1と同様である。刺激音は、4.4で用いた模擬音と同様である。

2) 実験手続き

前節の結果によって、すでに模擬騒音のうるささに等価な基準音のピークレベル(PSE)はわかっているのので、基準音レベルの調整をする出発点のレベルは比較的PSEに近い点にとることができる。すなわち、上昇系列の場合は、模擬騒音のピークレベルより5 dB 低いレベルから、また下降系列の場合は模擬騒音のピークレベルより10 dB 高いレベルから出発して基準音を調整させた。ただし、まず当初の設定レベルで1回提示し、下降系列の場合には基準音が模擬騒音より十分うるさいこと、また上昇系列の場合にはその逆であることを被検者に質問して確認した。

3) 被検者

被検者及び教示は4.4と同じである。

4.5.2 実験結果および考察

調整法による成績と一対比較マグニチュード評価法による成績とを Fig. 13 で比較した。Fig. 13 では、横軸にピークから10 dB 以内の時間で定義される継続時間 T_d ²⁸⁾ をとっている。本節の実験に用いた刺激音については、ピークの継続時間に4 sを加えると T_d となる。 T_d が5 s すなわちピークの継続時間が1 sの場合、調整法によ

る成績とマグニチュード評価法による成績とは近い値となっており、基準音(PSE)のピークレベルと台形状騒音のピークレベルとがほぼ等しい。これは、ピークの継続時間が1 sの台形状騒音は基準音と弁別するのも難しいほど基準音に似た音であるためと考えられる。しかし、 T_d が6, 8, 12 sと長くなるにつれて、調整法による基準音レベル(PSE)の増加より、一対比較マグニチュード評価法による基準音レベル(PSE)の増加の方が大きい。事実、Fig. 13のデータをおのおの T_d について平均し、最小自乗法によってあてはめた回帰直線の回帰係数から算出した場合、 T_d が2倍になったときの基準音レベル(PSE)の増加量は、マグニチュード評価法では3.5 dBであるのに対し、調整法では2.1 dBである。これより、一対比較マグニチュード評価法は、調整法に比べて、継続期間の効果に対し敏感であるといえる。

香野ら²⁹⁾がピンクノイズを用いて行なった同様な実験で得た成績では、ピークから10 dB 以内の時間で定義される継続時間(T_d)の効果は、2倍の T_d に対しうるささの等価な基準音のピークレベル(PSE)の増加は約1.5 dBであり、今回われわれがマグニチュード評価法で得た成績とは異なる。この理由としては第1に香野ら²⁹⁾が、PSEの決定に調整法を用いていることが考えられ、調整法とマグニチュード評価法とで実験結果に差が生ずることはすでにみたとおりである。しかし、同じく調整法を用いた本節の実験成績においても、なお、香野ら²⁹⁾の成績に比べ若干継続時間の効果が大きく現われているのは、duration cueの有無(香野らはduration cueを与えていない)による差、被検者による差、刺激音による差等によるためと解せられる。このうち、duration cueの有無による差は、Parry and Parry³⁵⁾によれば、倍の継続時間に対して、0.5~4.5 dBであり、今回のマグニチュード評価法による成績と香野ら²⁸⁾の成績との差もこの範囲内に入っている。しかし、同一被検者についてduration cueの有無の差を検討することは困難であり、実験的にこの点を検討することはしなかった。また今回の成績中調整法によったものと、香野ら²⁸⁾の成績との比較からduration cueの有無による差を算出することも考えられないことはないが、被検者による差等そのほかの要因を除去し、duration cueによる差のみを独立に吟味することはできないから、現段階においては、このような算出は省略した。

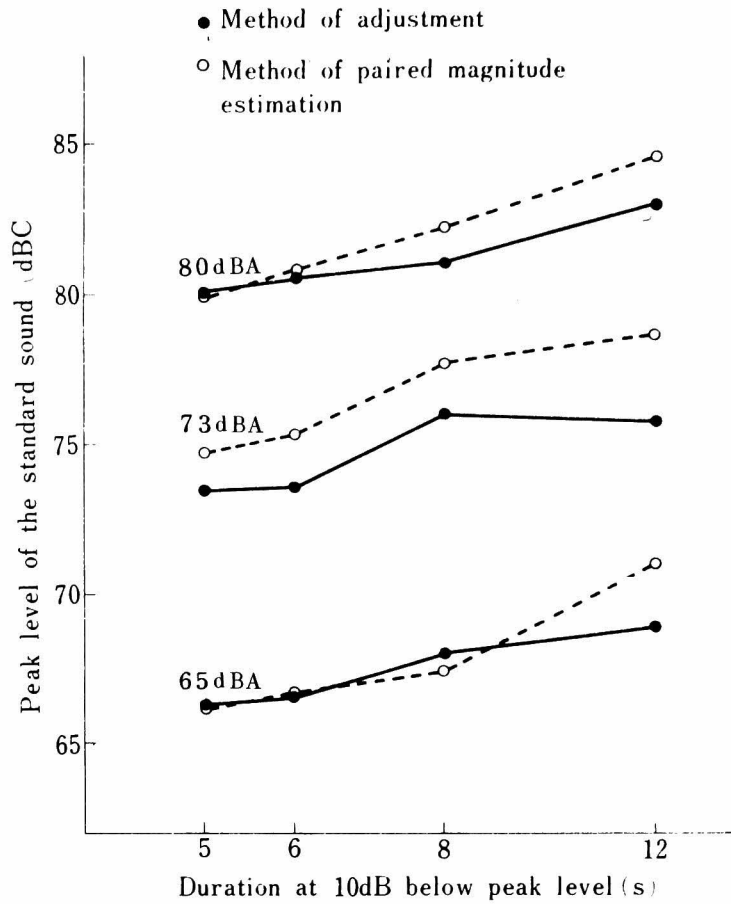


Fig. 13 Comparison of the results obtained by the method of adjustment and the method of paired magnitude estimation. Figures show the peak levels of the trapezoidal noises. Method of adjustment is less sensitive to duration effect than method of paired magnitude estimation.

参 考 文 献

- 1) 近藤 暹：複合音の評価と予測に関する研究，
京都大学学位論文（1975）p. 92
- 2) 泉 清人：継続性騒音の不快感の評価に関する研究，
京都大学学位論文（1978）p. 40
- 3) D.A.Laird and K.Coye: Psychological
measurements of annoyance as related
to pitch and loudness. J. Acoust. Soc.
Am., 1 (1929) p.158
- 4) K.D.Kryter: Annoyance (Perceived
Noisiness), Transportation Noises,
Univ. Washington Press, (1970) p.69
- 5) K.D.Kryter: The meaning and measure-
ment of Perceived Noise Level. Noise
Control, 6(5) (1960) p.12
- 6) K.D.Kryter and K.S.Pearsons: Some
effects of spectral content and du-
ration on Perceived Noise Level. J.
Acoust. Soc. Am., 35(6) (1963) p.866
- 7) S.S.Stevens: Procedure for calculat-
ing loudness: Mark VI, J. Acoust. Soc.
AM., 33(11) (1961) p.1577
- 8) S.S.Stevens: On the quantitative
evaluation of noise. Transportation
Noises, Univ. Washington Press, (1970)
p.114
- 9) S.S.Stevens: Perceived Level of
noise by Mark VII and decibels (E),
J. Acoust. Soc. Am., 51(2) (1972) p.
575
- 10) J.C. Kerrick, D.C.Nagel, and R.L.
Bennett: Multiple ratings of sound
stimuli. J. Acoust. Soc. Am., 45(4)
(1969) p.1014
- 11) von V.W.Rahlfis und A.Schaaf: Eine
Psychometrische Untersuchung der
Lästigkeit von Geräuschen, Acustica,
24 (1971) S.340
- 12) von E.Zwicker: Ein Beitrag zur
Unterscheidung von Lautstärke und
Lästigkeit. Acustica, 17 (1966) S.22
- 13) B.Scharf: Loudness and noisiness-
same or different?, Inter noise '74,
(1974) p.559
- 14) S.S.Stevens: Psychophysics, John
Wiley & Sons, N.Y. (1975) p.26
- 15) J.Merkel: Die Abhängigkeit zwischen
Reiz und Empfindung. Phil. Stud., 4
(1888) p.541
- 16) L.F.Richardson and J.S.Ross: Loud-
ness and telephone current. J. Gen.
Psychol., 3 (1930) p.288
- 17) L.B.Ham and J.S.Parkinson: Loudness
and intensity relations. J. Acoust.
Soc. Am., 3(1932) p.511
- 18) P.H.Geiger and F.A.Firestone: The
estimation of fractional loudness.
J. Acoust. Soc. Am., 5 (1933) p.25
- 19) S.S.Stevens: A scale for the measure-
ment of a psychological magnitude:
loudness. Psychol. Rev., 43 (1936) p.
405
- 20) 柿崎祐一：知覚判断，培風館，東京（1970）
p. 73
- 21) S.S.Stevens: The direct estimation
of sensory magnitude — loudness.
Am. J. Psychol. 69 (1956) p.1
- 22) 前掲 20) p. 82
- 23) J.C.Stevens and J.W.Hall: Brightness
and loudness as functions of stimulus
duration. Perception and Psychophysics,
1 (1966) p.319
- 24) 前掲 14) p. 31
- 25) 前掲 20) p. 88
- 26) 相場 覚：Stevens の新精神物理学，講座心
理学 4 知覚，東京大学出版会，東京，（1970）
p. 261
- 27) 齊藤堯幸，小川定暉，野嶋栄一郎：一次元尺
度構成に関する総合報告，総研紀要 2 (2)
（1972）p. 300
- 28) 香野俊一，曾根敏夫，二村忠元：鉄道騒音の
うるささに関する考察，音響学会誌 29 (4)

- (1973) p. 225
- 29) 福原博篤, 奥田三雄: 模擬騒音レベル発生装置の試作について, 音響学会講演論文集, (1973, 10月) p. 353
- 30) ISO-532: Method for calculating loudness level (1966)
- 31) ISO-507: Procedure for describing aircraft noise around an airport (1970)
- 32) S.S.Stevens: Perceived Level of noise by Mark VII and decibels (E), J. Acoust. Soc. Am., 51(2) (1972) p. 575
- 33) W.R.Garner: A technique and a scale for loudness measurement. J. Acoust. Soc. Am., 26(1) (1954) p.73
- 34) A.L.Comrey: A proposed method for absolute scaling. Psychometrika, 15 (1950) p.317
- 35) H.J. Parry and J.K.Parry: The interpretation and meaning of laboratory determination on the judged acceptability of noise. J. Sound Vib., 20 (1) (1972) p.51

第3章 騒音のうるささに及ぼす 立上り速度の効果

第3章 騒音のうるささに及ぼす 立上り速度の効果

1. はじめに

航空機騒音、列車騒音、自動車騒音等の間欠的騒音は必ず立上り部分を有している。レベルの時間的変動パターンが台形状を呈する騒音（例えば列車騒音）を想定した場合、立上りが急峻であるほどうるさく感じられるのは日常経験するところであるが、そのレベルが一定になるまでの部分（立上り部分）に含まれる音響エネルギーは、立上りが急峻になるほど減少するので、騒音の物理的なパラメータとうるささとの関係を論ずる場合、立上りの効果を把握しておく必要がある。

また、翻って考えれば、立上りの問題は、騒音のラウドネス、うるささ等の測定を実験室内で行う場合には、被検者に呈示する刺激音の問題として必ず付随する問題でもあって、単に現実の騒音の評価において重要であるばかりでなく今後騒音のうるささを実験的に研究する上においても重要である。

本章では、刺激音の立上り部分及び立下り部分を音圧レベルが時間に対して直線的に上昇及び下降するようにし、立上りを立上り速度 (dB/s) で表現して、これを 25 dB/s から 1000 dB/s の範囲に変化させて、立上り速度とうるささとの関係を検討する。

2. 実験方法

2.1. 刺激音の作製

正弦波ランダム信号発生装置 (Sine Random Gene-

rator, Brüel-Kjær 1024) で発生させたホワイトノイズを騒音レベル制御装置 (Noise Level Controller, 森技研 SG-112) に入力し、そのレベルをコントロールした後、増幅器 (Amplifier, SONY-3200F) で増幅して、静電型イヤスピーカー (Ear Speaker, STAX SR-X) で発生させた音を刺激音とした。

刺激音のレベルの監視は、人工耳 (Artificial Ear, Brüel-Kjær, 4153) と精密騒音計 (Precision Sound Level Meter, Brüel-Kjær, 2203) とで行った。刺激音の発生と監視に用いた機器のブロック図を Fig. 1 に示す。

騒音レベル制御装置 (森技研, SG-112) は、on-time (T_1), off-time (T_2), 反復回数(N), 入力源(S), 減衰量 (E_1, E_2) に関する情報をプログラムしておき、入力信号を所定のプログラムに従って変化させる装置である。その外観を Fig. 2 に、又ブロック図を Fig. 3 に示す。

上記 6 変数を、Table 1 に示した仕様の範囲内で変えて、プログラムを作る。プログラムは紙テープにパンチして、テーブリーダーによって読みこませて、4 k バイトのコアメモリーに記憶する。実験時に、これを再生することによって、入力信号のレベルをコントロールし、時間的に任意に変化させることが可能である。

以下に、刺激音の物理性状に関連する部分について、概説する。

on-time と off-time の時間条件は、水晶発振器の 1 MHz クロックゲート信号で制御され、その誤差は 1 ms 以下である。また手動操作により設

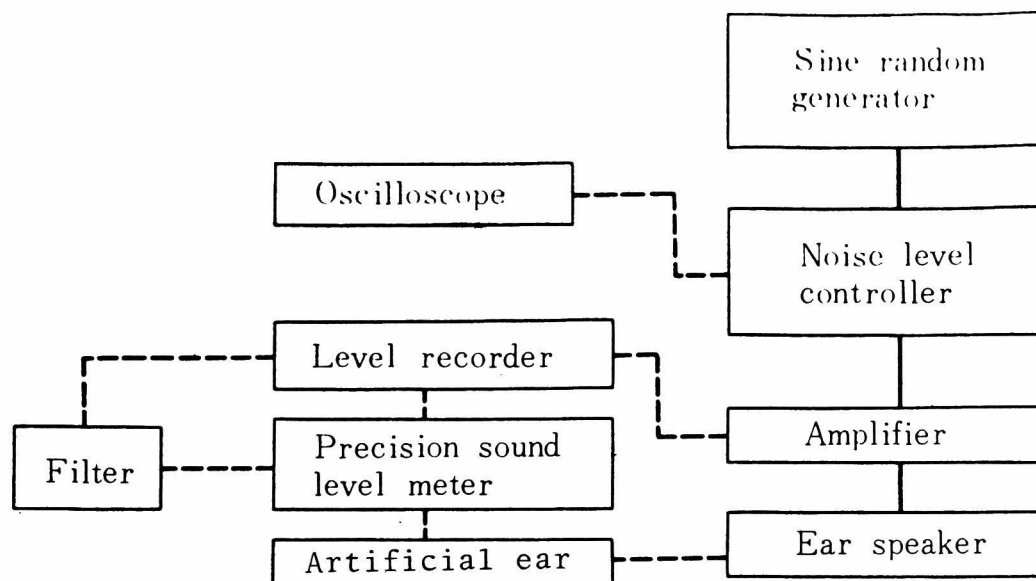


Fig. 1 Block diagram of stimulus-generating and
-analyzing equipment.

定時間を10倍することができる。

繰返しは、on-time と off-time の1組を1サイクルとして、繰返す。

入力源は、30個のうち1つを選択することができる、そのうち10個については、手動で入力レベルを変えられるように、ポテンショメーターが付いている。この選択は、アナログスイッチで行なっている。

減衰量は、アナログスイッチを用いた高速減衰器によって、制御される。減衰量 E_1 と E_2 は次の点で異なる。すなわち、 E_2 は各時刻のレベルを制御し、 E_1 は E_2 によって作られたレベル変化（例えば台形状騒音）の相対的なレベルを変えることなく、絶対レベルを変えるために作られている。また、 E_2 を用いた場合には、レベルが変化する場合に、後述する立上り、立下りの部分が付与される。

音の開始時に、音圧の包絡線を矩形状にしておくと、クリックが生じるので、これを防ぐために、立上り時間を付与する。これは、10回転ポテンショメーターと、1倍、10倍、100倍の切替スイッチとを、手動で設定して1 ms～1 s の範囲で変えることができる。立上り部分は、音圧が時間に対して直線的に上昇するようになっている。立下り部分も、同様である。かりに立上り時間と立下り時間を10 ms とし、on-time を100 msとした場合には、ピークの継続時間は90 ms となりその両側に10 ms の立上り、立下り部分が付与される。

その他、装置の動作について以下に概説する。

プログラムとして入力する情報は、 E_2 を除いて、その一部又は全部をパネル上で手動設定することができる。

プログラムの実行の開始は、通常ボタン操作で行なうが、外部からのトリガー信号によっても可能である。

一対比較の実験ができるように、出力端子が二つあり、交互に出力するか、いずれか一方を占有的に用いて出力するかを選択することができるようになっている。

被検者反応ボックスを用いて、防音室内の被検者が、 E_1 の値を変化させ、あるいはプログラムの実行を命令することができる。調整法の実験結果の記録のために、 T_1 、 T_2 、 N 、 S 、 E 、の値を印字することができる。

この装置を用いて作り得る刺激音は、1 ms 毎にレベルを変えた場合には、継続時間は約4 s ま

である。しかし、実際には数 ms～数10 ms 毎にレベルを変化させれば、本研究で用いた刺激音については十分であり、プログラムの工夫によって、数100 s の変動騒音を作製することは容易にできる。

2.2 刺激音

刺激音にはホワイトノイズを用いた。刺激音の1/1オクターブ、1/3オクターブバンド分析の結果をFig. 4に示す。図中に黒丸で示したのが1/1オクターブバンド分析の結果である（オーバーオール音圧レベルは90dB）。一点鎖線で示した直線は3 dB/oct. の傾きを有する直線であり、この直線に対し ± 2 dB の距離をもつ2本の平行線も併記した。

Fig. 5は刺激音のレベル変動のパターンを模式的に描いた図である。すなわち、刺激音は主としてFig. 5の上図に示すような定常音に立上りと立下りの部分を付した騒音を用いた（立上りと立下りとは等しくしたので以下簡単のため立上りとのみ記す）。立上りについては、立上り時間（rise time；R. T.）又は立上り速度（rising speed；R. S.）で表現する。前者は30dB（SPL）からピークレベルに到るまでの時間、後者は単位時間当りのレベルの増加率（dB/s）のことである。また、継続時間（duration）は、ピークレベルが継続する時間（Fig. 5では台形の上底の部分に相当）のことであり、off-timeは、刺激間の時間間隔をいい、その時間におけるSPLは30 dB である。

Table 2 に実験で用いた刺激音の物理性状を示した。ピークレベルとして、70～90 dB の5種類を、立上り速度として、25～1000 dB/s の8種類を選び、これらを組合せた計40種類の刺激音を用いた。ピークの継続時間は2.5 s と固定した。25 dB/s の立上り速度は、例えばピークレベルが80 dB の場合であれば、30 dB からピークに至るまでの時間（立上り時間）が2 s である。1000 dB/s の立上り速度では同じくピークレベル80 dB の場合には、立上り時間が50 ms である。

2.3 刺激音の呈示

刺激音の呈示にあたってはTable 2に示した40種の刺激音をランダムに配置して1つの刺激系列を作る。この場合、刺激間時間間隔（Fig. 5に示すoff-time）は、30 dB SPLにおいて2 s となるようにした。次にこれと逆の順序の系列を作り、正逆両順で一対の刺激系列を作る。このような刺激系列対を5対作製し、そのうちの2対を任意に選んで被検者に呈示した。

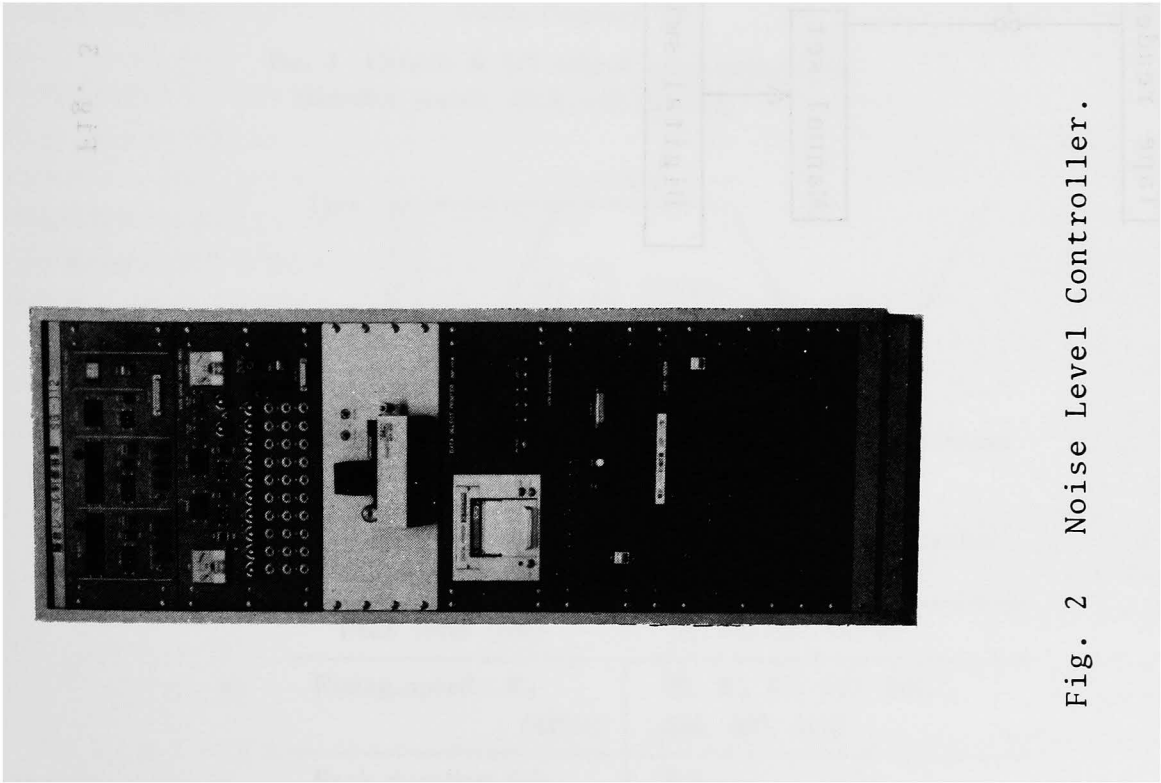


Fig. 2 Noise Level Controller.

Table 1 Variable range and step of each panel

Panel	Range	Variable step
T ₁ (on-time)	0-9999 ms	1 or 10 ms
T ₂ (off-time)	0-9999 ms	1 or 10 ms
N (Number of repetition)	0-99	1
S (input channel)	30 channels	
E ₁ (attenuator) E ₂	0-63dB	1 dB

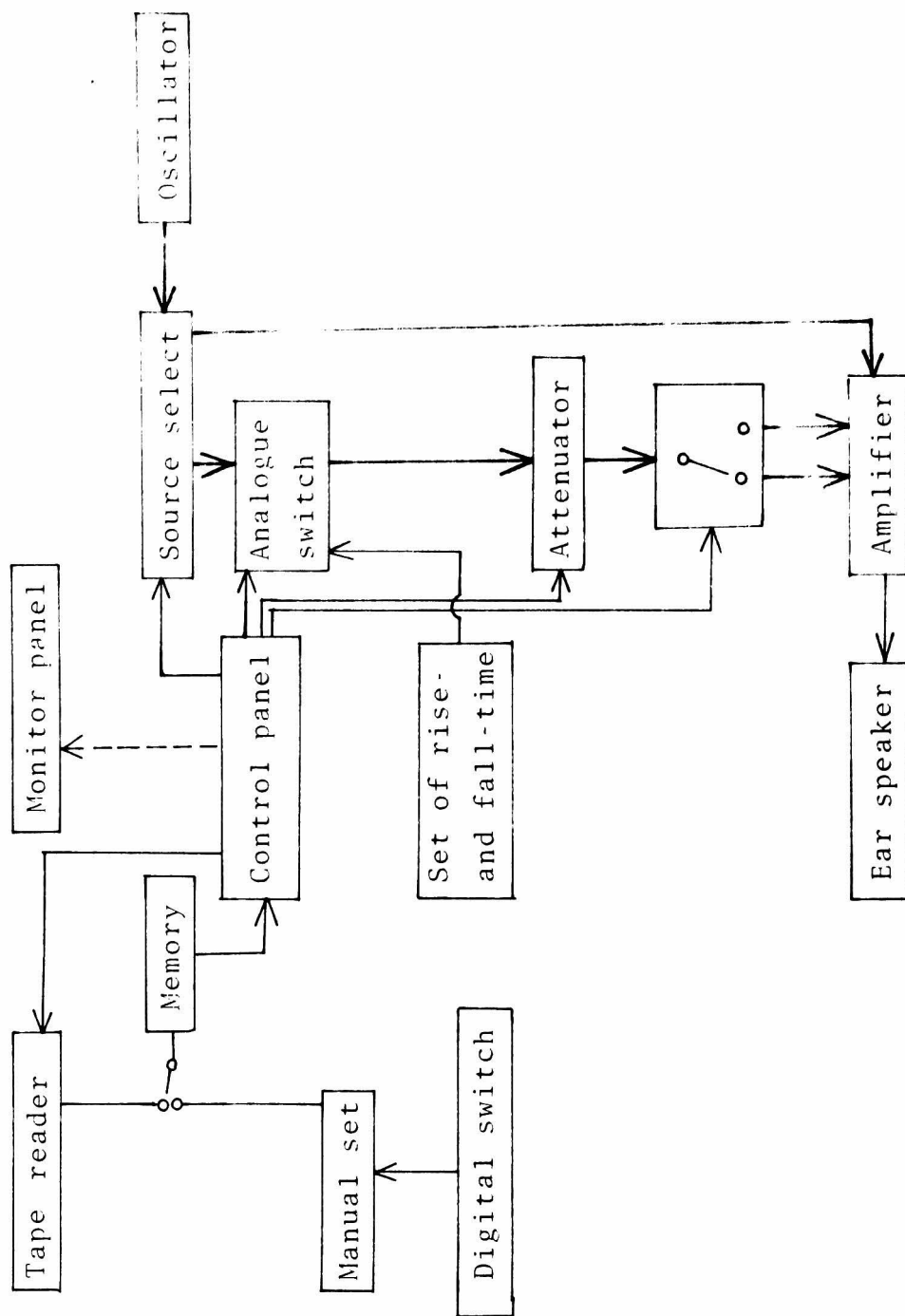


Fig. 3 Block diagram of Noise Level Controller.

2.4 うるささの判定

うるささの判定はマグニチュード評価法によった。前節に記したようにして次々と呈示される一連の刺激音に対して、被検者はその個々の音のうるさを評価し、点数をつける。この点数は比の値が意味をもつように評価することを被検者に求めた。すなわち、被検者は、最初呈示される音のうるささに対して任意の数値を与える。次に呈示される音のうるささが前の音のうるささの2倍と判定したなら前の数値の2倍の数値を与え、1/5と判定したなら1/5の数値をつける。これを続けて次々と呈示される音のうるささに対して点数を与えるのである。

音のうるささの判定は、単に音が大きい小さいだけでなく、耳障りであるとか、不快であるとか、びっくりしたといった感じをも含めて、総合的な感じから評価するよう被検者に指示した。

2.5 被 検 者

聴力正常な20才台の男女学生各10名ずつ、計20名を選定し、被検者とした。

各被検者は、本実験に入る前に比の感覚の把握及び評点の仕方の練習のために10数種の長さの線分で10~20回程度 magnitude estimation 及び magnitude production の練習を行い、更に 60~90 dB の範囲の騒音をも用いて同様の練習を行った。

3. 実 験 結 果

各被検者は各刺激音に対して任意に数値を与えているので実験で得られた点数はそのままでは意味がなく、数値間の相対的な比のみが意味を有する。ピークレベル 80 dB、立上り速度 100 dB/s の音のうるささの値を1としてその他の音のうるささの比の値を計算した。Fig. 6 はそれらの比の値を全被検者の全試行について（データ数

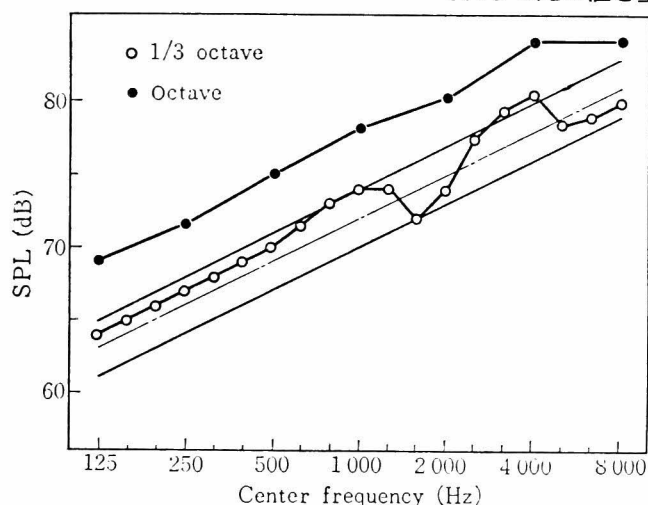


Fig. 4 Octave & 1/3 octave band analysis of stimulus sound. O. A.=90 dB SPL

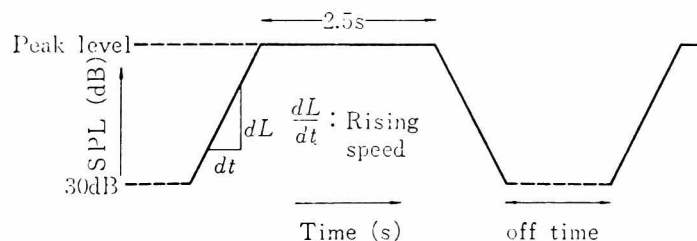


Fig. 5 Time pattern of stimulus sound. Peak duration is fixed at 2.5 s.

Table 2 Some physical characteristics of stimulus sounds used in the experiment.

Peak level (dB)	70, 75, 80, 85, 90
Rising speed ; R_s (dB/s)	25, 50, 67, 100, 200, 250, 500, 1000
Peak duration (s)	2.5

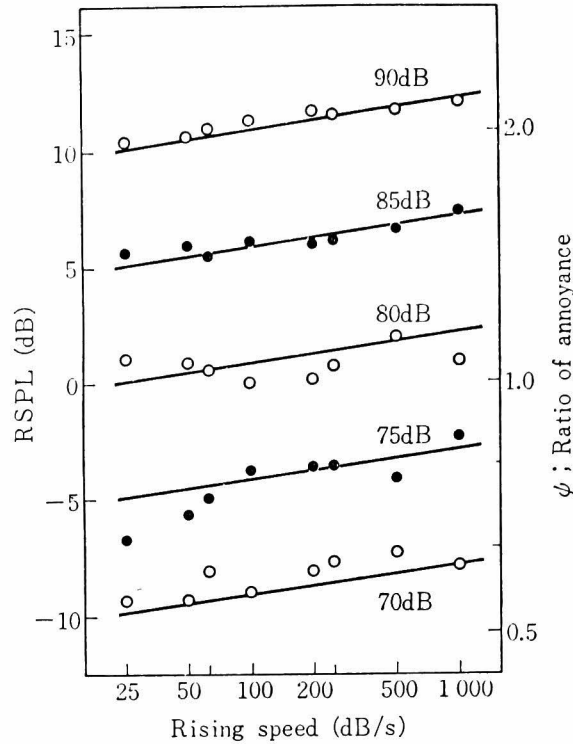


Fig. 6 Experimental results and regression line for each peak level obtained from Eq. (2).

80) 幾何平均した結果を、立上り速度の対数に対してプロットした図である。図から立上り速度が増す程うるささが增大していることがわかる。今、うるささの比の値を ϕ とし、 ϕ の対数が立上り速度 R_s の対数に対して直線的に比例して増加すると仮定し、次式が成立するとして重回帰分析を行った。

$$\log \phi = AL + B \log R_s + C, \quad (1)$$

ここに L はピークレベルである。その結果 A , B , C は次式のように求められた。すなわち、

$$\log \phi = 0.0278 L + 0.0346 \log R_s - 2.269. \quad (2)$$

この式の回帰係数はいずれも有意（有意水準；0.05）であり、重相関係数は0.991であった。

実験は、各被検者が各刺激音を4回ずつ判定しているため、これを4回の反復実験が独立に行われたとし、反復による誤差が被検者によって変わらないとすると、Fig. 6に示した各点すなわち各刺激音に対する判定の母平均 μ の95%信頼限界は、次式で表される²⁾。

$$\bar{x} + t(19; 0.05) \sqrt{\frac{v_A^2}{4 \times 20}} > \mu > \bar{x} - t(19; 0.05) \cdot \sqrt{\frac{v_A^2}{4 \times 20}}, \quad (3)$$

$$v_A^2 = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{20} \left\{ \sum_{j=1}^4 x_{ij} / 4 - \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{20} x_{ij} / 80 \right\}^2 / 19, \quad (4)$$

ここに x_{ij} は i 被検者の j 番目の判定結果、 ϕ は反復回数、20は被検者数、 $\bar{x} = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^{20} x_{ij} / 80$, $t(19; 0.05)$

は自由度19の t 分布の5%点の値である。

実際のデータではこの信頼限界の幅は刺激音によって異なった値を示しているが、例えばその平均値は、0.047であり、これは相対的音圧レベル（RSPL）では1.7dBに相当する。各音圧レベル並びに立上り速度別に計算した $\log \phi$ の平均値と、その95%信頼限界をTable 3に示した。

(2)式より、 L が10.8dB増加して、 ϕ が2倍になるという関係が得られるが、これを図示するため、各ピークレベルごとにデータを幾何平均してピークレベルに対してプロットしたのがFig. 7である。この関係を利用すれば、うるささの比に対応するRSPLを計算できるので、 $\phi=1$ の時RSPL=0dBとしてFig. 6の左の縦軸にRSPLを示した。

また、(2)式から立上り速度が25dB/sの音に比べて、それが1000dB/sの音は1.14倍うるさく感じられ、これは音圧レベルの2.0dBの増加に等価であることが知られる。この関係を図示するため、各ピークレベルごとにうるささの比を平均し、立上り速度に対してプロットしたのがFig. 8である。

4. 考 察

4.1 騒音のエネルギーの補正をした立上り効果

今回の実験に用いた刺激音は、ピークの継続時間を

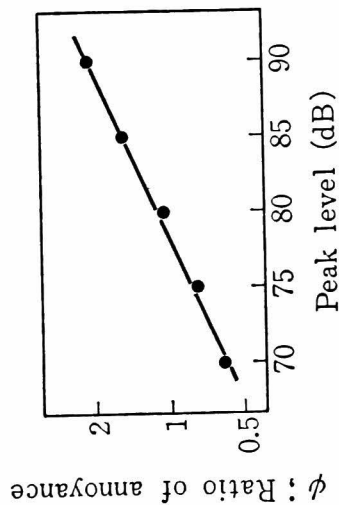


Fig. 7 Relation between peak level and annoyance.

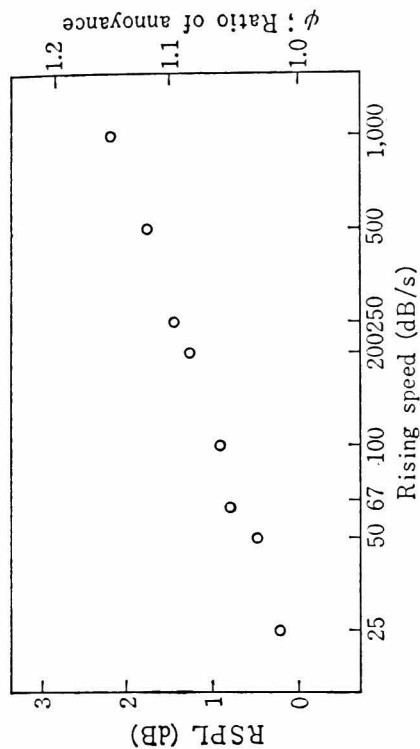


Fig. 8 Average annoyance increase with rising speed. Each plott is the average of results shown in Fig. 6.

Table 3 Mean and its 95% confidence limit (95% C.L.) of $\log \psi$ for each stimulus.

Peek level (dB)	R_s (dB/s)	25	50	67	100	200	250	500	1000
70	Mean	-0.262	-0.262	-0.223	-0.253	-0.223	-0.213	-0.203	-0.222
	95% C.L.	0.065	0.047	0.044	0.053	0.051	0.051	0.039	0.053
75	Mean	-0.188	-0.153	-0.138	-0.105	-0.100	-0.097	-0.117	-0.067
	95% C.L.	0.053	0.030	0.033	0.053	0.049	0.044	0.044	0.053
80	Mean	0.032	0.023	0.014	0.0	0.005	0.019	0.056	0.026
	95% C.L.	0.044	0.039	0.036	0.0	0.044	0.039	0.042	0.042
85	Mean	0.155	0.160	0.153	0.169	0.167	0.171	0.184	0.205
	95% C.L.	0.044	0.042	0.047	0.042	0.042	0.036	0.044	0.061
90	Mean	0.291	0.295	0.304	0.313	0.325	0.320	0.326	0.363
	95% C.L.	0.053	0.053	0.057	0.061	0.061	0.059	0.068	0.071

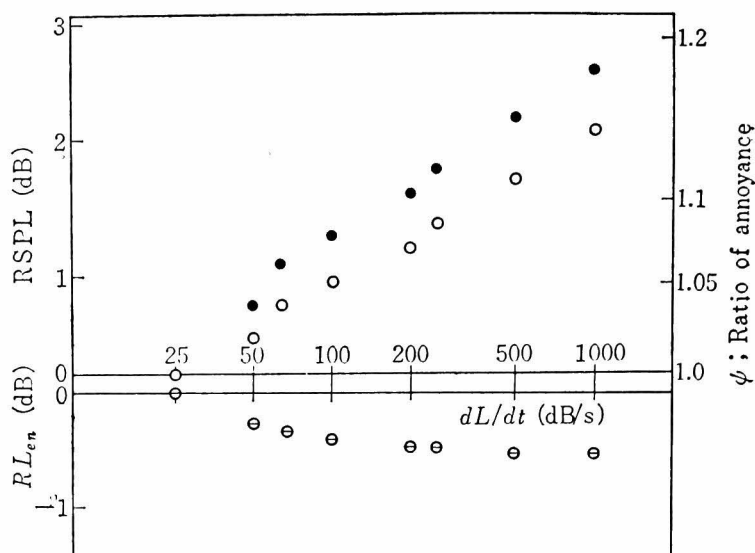


Fig. 9 Increase of annoyance (○), decrease of sound energy (⊖), and corrected increase of annoyance (●) with rising speed. RL_{en} denotes relative energy level (dB).

2.5s と固定し、立上りと立下りの部分を変えて各種の刺激音としているので、立上り速度が異なると刺激音に含まれる総音響エネルギーも異なる。実験に用いた刺激音の総音響エネルギーを dB 表示して $L_{en}^{3)}$ で表し、立上り速度が 25 dB/s の時の L_{en} を 0 dB として各立上り速度についてその相対値 (RL_{en}) を計算した結果を Fig. 9 の下側にプロットした。ここに L_{en} は次式で定義されている。

$$L_{en} = 10 \log_{10} \int_0^T 10^{L(\tau)/10} d\tau. \quad (5)$$

厳密に言えば、同じ立上り速度を有する音でも、例えばピークレベルが 20 dB 増加すれば、 L_{en} は 20 dB 以上の増加となるが、今回用いた刺激音の範囲内では、その増加分は無視し得る（例えば、立上り速度 25 dB/s の場合ピークレベルが 70 dB から 90 dB になった時、 L_{en} は 20.0003 dB の増加となる）。

立上り速度の増加による刺激音の音響エネルギーの減少の様子は Fig. 9 に示されている。このように、騒音の立上り速度が増せば騒音のエネルギーは減少するにもかかわらず、うるさは増大している。しかし、立上りの効果の評価は、等エネルギーの騒音について比較する必要があるとも考えられる。騒音のうるさが、騒音のエネルギーに近似的に比例することは既に報告した¹⁾。また、このことは音圧が時間に対して直線的に増加し、ピークの継続時間と立下り時間とを有しない三角形状騒音（立上り音）についても成立する⁴⁾。

したがって、今回の実験結果についても立上り速度の増加によるエネルギーの減少分を RSPL で表現したう

るささの増加分に加算して補正した。その関係を Fig. 9 に示した。図の白丸は立上り速度 = 25 dB/s の音のうるささの比を 1 とし、またその RSPL を 0 dB として、実験結果 (Fig. 8 の成績) をプロットし直した成績であり、同じく黒丸は、白丸の RSPL に対し、図の下側にプロットした RL_{en} ($R_s = 25$ dB/s の音の L_{en} を 0 dB とした時の相対的 L_{en}) の値を補正した成績である。この黒丸の成績はエネルギーが等価な場合の騒音の立上り速度がうるささに及ぼす効果を示すと考えられる。今回の実験結果では、結局立上り速度が 1000 dB/s の音はそれが 25 dB/s の音に比べてうるさは約 1.2 倍で、その増加に相当する音圧レベルの増加は約 2.6 dB である。

今回の実験に用いた刺激音は立上りの部分の音圧レベルが時間に対して直線的に増加する刺激を用いたので、実験結果を立上り速度 R_s (dB/s) で整理した。しかし従来行われた立上り効果の実験^{5), 6)} においては、立上りが立上り時間 (rise time) で表現されているので、これらを今回の実験結果と比較するために立上り部分を立上り速度に換算すると、Vigran ら⁵⁾ の用いた刺激音のうち、広帯域騒音では 50 dB 上昇するのに要する時間が 0.025 s から 1.6 s で、これは立上り速度を 2000 dB/s から 31 dB/s としたことになる。この立上り時間の差によるラウドネスの増加はピークレベル 85 dB の場合音圧レベルの 4.23 dB の増加に相当しているが、今回の実験結果からこれを計算すると 2.24 dB となり、今回の結果はかなり低い値となっている。また、Gjaevenes ら⁶⁾ がその後行った追試では、立上り時間 0.04 s から 0.48 s の刺激

音を用いており、これは立上り速度の 1250 dB/s から 104 dB/s に相当する。この場合、うるささの増加に相当する音圧レベルの増加は 0.8 dB であり、今回の結果からこれを計算すると 1.5 dB となって今回の結果の方が大きい値となっている。

4.2 立上りについて

レベルが時間的に線型に増加するように立上りを設定した場合、心理量はレベルの上昇と共に急激に増大することを被検者は報告している。また、Marks ら⁷⁾ はこれとは逆に、心理量が時間的に線型に増加するような音圧レベルの増加の関数を実験的に求めた。それによると、心理量の増加が時間的に線型であるためには、音圧 p (P_a) と時間 t (s) との間に

$$p = ct^{1.5}, \quad (6)$$

なる関係が成立する。ただし c は定数である。ちなみにこの関係は、心理量 m が時間的に線型に増加する時、

$$m = c't = c''p^{0.67} \quad (c', c'' \text{ は定数}), \quad (7)$$

となり、ベキ法則の妥当性の証左ともなっている。

したがって、騒音のうるささに及ぼす立上りの効果を問題にする場合、心理量の時間的増加率によって立上りの効果を把握するのが最も合理的であると考えられる。しかし一方、現実の騒音では、心理量の時間的増加率を把握するのは困難であり、諸家の成績によっても立上りの効果は数 dB 程度となっているので実際は立上りを立上り時間又は立上り速度のいずれかで把握しても、立上り効果の補正には大差ない結果になると思われる。

立上りの急峻な音のうるささの増大を startle effect (驚愕効果) と呼ぶこともあるが、これはソニックブームのような衝撃音で、その音が常習的に起るとは考えられていない場合に適切な呼称であろう。しかし、実験室内でこの種の実験を行う場合には被検者は騒音が発生するのを知っており、ソニックブームを呈示する場合でも startle effect は減少すると言われている⁸⁾。今回筆者が行った実験条件でも被検者が騒音の発生を知っているという点では同様であり、まして刺激音そのものもソニックブームほど驚愕的ではない。したがって、今回の成績も Kryter⁹⁾ の提唱する衝撃性の補正量に比べて著しく低い値となっているが、これは一つには上述のような理由によるものであると考えられる。この点、実験方法を改善することが今後の課題であろう。

4.3 ピークレベルとうるささとの関係

既に述べたように、今回の実験結果ではピークレベルが 10.8 dB 増加してうるささが 2 倍になっている。ピークレベル L (dB) の時の音の強さを I (watt/m²) とすると、

$$L = 10 \log_{10}(I/I_0), \quad (I_0 = 10^{-12} \text{ watt/m}^2) \quad (8)$$

であるから、(2)式と(8)式より、

$$\phi = \alpha I^{0.278}, \quad \alpha : \text{定数} \quad (9)$$

という関係が得られる。

このベキの値 0.278 は S. S. Stevens¹⁰⁾ が得ている値 0.33 よりやや小さくなっている。これはマグニチュード評価法を用いて判定を行ったことによる回帰効果¹¹⁾のためと考えられる。また、騒音の継続時間がうるささに及ぼす効果を検討した同様の実験で得られた値 0.203 より大きくなっているのは、継続時間の実験に比べて本実験は課題が容易であること¹²⁾、刺激の強度範囲が狭いこと¹³⁾が理由と考えられる。

5. 要 約

白色騒音のレベルを 70~90 dB の 5 種類選び、その立上り速度を 25 dB/s から 1000 dB/s まで 8 種類選定して、男女各 10 名、計 20 名の被検者に 4 回ずつ判定させ、マグニチュード評価法でうるささの測定を行った。

その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 25 dB/s から 1000 dB/s までうるささは立上り速度の対数に比例して増加する。
- (2) 25 dB/s の立上り速度を有する音に比べて、1000 dB/s の立上り速度を有する音のうるささの増加は、平均的にみて音圧レベルの約 2 dB の増加に等価であった。したがって立上り速度が 2 倍になるごとにうるささの増加は音圧レベルの 0.37 dB の増加に等価である。
- (3) 立上り速度が急峻となることによる音響エネルギーの減少を dB 表示し、(2)の結果に補正した場合、25 dB/s の立上り速度を有する音に比べて 1000 dB/s の立上り速度を有する音のうるささの増加は、音圧レベルの約 2.6 dB の増加に等価であった。したがって、立上り速度が 2 倍になるごとに、うるささの増加は、音圧レベルの 0.46 dB の増加に等価である。

参 考 文 献

- 1) 平松幸三, 高木興一, 山本剛夫, 池野淳: 騒音のうるささに及ぼす継続時間の効果, 音響学会誌, 32(12)(1976)p.739
- 2) 近藤良夫, 舟阪渡: 技術者のための統計的方法, 共立(1967) p.169
- 3) 香野俊一, 曾根敏夫, 二村忠元: 鉄道騒音のうるささに関する考察, 音響学会誌, 29(1973) p.225
- 4) 難波精一郎, 桑野園子, 加藤徹: 音の立上り時間と大きさについて — エネルギー値との関係 —, 音響学会誌, 30(1974) p.144
- 5) E.Vigran, K.Gjaevenes and G.Arnesen: Two experiments concerning rise time and loudness. J. Acoust. Soc. Am., 36(1964) p.1468
- 6) K.Gjaevenes and E.R.Rimstad: The influence of rise time on loudness. J. Acoust. Soc. Am., 51(1974) p.1233
- 7) L.E.Marks and A.W.Slawson: Direct test of the power function for loudness. Science 154 (1966) p.1036
- 8) K.D.Kryter: The effects of noise on man, Academic Press, N.Y. (1970) p.413
- 9) 同上 p.301
- 10) S.S.Stevens: Perceived Level of noise by Mark VII and decibels (E). J. Acoust. Soc. Am., 51(2) (1972) p.575
- 11) S.S.Stevens and H.B.Greenbaum: Regression effect in psychophysical judgement. Perception and Psychophysics, 1 (1966) p.439
- 12) J.C.Stevens and J.W.Hall: Brightness and loudness as functions of stimulus duration. Perception and Psychophysics, 1 (1966) p.319

第4章 騒音のうるささに及ぼす 継続時間の効果

第4章 騒音のうるささに及ぼす 継続時間の効果

1. はじめに

聴覚に特定のラウドネスを生ぜしめる刺激音の強さと継続時間との間には、関数関係が成立することを、Békésy¹⁾ が明らかにして以来、この現象は聴覚の積分機構を知るうえでの重要な問題として多くの研究者の関心を集めてきた。諸家の結果を総合すれば大略次のように言うことができよう。すなわち、短音のラウドネスは、継続時間が増加するに伴い、臨界継続時間 (critical duration) が約200msに至るまで、ほぼ音のエネルギーに比例して増加し、その後は継続時間が増加してもラウドネスは一定である。

音の継続時間が1sを超える場合には、その音のラウドネスは、順応²⁾あるいは疲労¹⁾のためラウドネスロスが起るとも考えられる。しかし、航空機騒音のうるさを評価する目的で騒音の継続時間とうるささとの関係を検討するため行われた実験の結果では、ノイジネスロスはみられなかった³⁾。

騒音のうるささと継続時間との関係を実験的に検討することは容易なことではなく、なお未解決な問題が残されている。これまでに行われた報告を整理すると、次の4点が主たる問題であると考えられる。すなわち、うるささに及ぼす継続時間の効果 (duration effect) は、

- (1)継続時間が2倍になった時、音圧レベルが何dB増加した時と等価であるか。
- (2)この(1)の効果は、継続時間によって異なるか。
- (3)同じく(1)の効果は、騒音のレベルによっても異なるか。
- (4)同様に、duration cue (継続時間の手掛り)の有無によっても異なるか。

の4点である。

(1)に関しては、Kryter et al.³⁾ は1.5~12sの範囲で4.5 dB/doublingを、Pearsons⁴⁾ は4~64sの範囲で2.5 dB/doublingを、Pearsons⁵⁾⁶⁾ は1~100sの範囲で2.6 dB/doublingという値を得ている。Kryter⁷⁾ はこれらの結果をまとめて、3 dB/doublingとして取扱ってもよいとし、Ollerhead⁸⁾ もこれを認めている。

(2)のduration effectが継続時間の長さによって変るといふ報告は、Pearsons⁴⁾、Sternfeld et al.⁹⁾が行っている。Sternfeldは被検者に“work”と“leisure”の2種の時間を与えて日常生活に似せた実験環境を作り、系列範疇法によって測定した結果、継続時間が15~30sで2 dB/doubling、30~60sで1.5 dB/doubling、60~120sで1 dB/doubling、120~240sで0.75 dB/doublingになるとしている。

(3)に関しては、香野ら¹⁰⁾が鉄道騒音のうるささに関連

して測定した結果では、duration effectは騒音のレベルが高い程大きくなり、ピークレベルが60 dBAの場合約1.2 dB/doubling、ピークレベルが80 dBAの場合約1.8 dB/doubling (いずれもduration cue無し)であった。

(4)騒音のうるささに及ぼす継続時間の効果について実験する場合、被検者に継続時間をも考慮させるか否か (すなわちduration cueを与えるか否か)で結果が異なることを指摘したのは、Little and Mabry¹¹⁾である。Parry and Parry¹²⁾は諸家の結果をまとめて、duration effectは、duration cueがある場合には、2~6 dB/doubling、またduration cueが無い場合には0~1.5 dB/doublingとしている。

筆者はこれらの4問題点のうち(1)~(3)までの3点を検討するため、30 msから90sまでの範囲で継続時間を14種類選定し、それらの音のうるさをマグニチュード評価法¹³⁾によって測定した。本章では、その結果を解析して、上記の3問題に関して検討した。

2. 実験方法

2.1 刺激音の作製

刺激音の作製と監視に用いた装置の接続図をFig. 1に示す。

正弦波ランダム信号発生装置 (Sine Random Generator, Brüel-Kjær 1024)で発生させたホワイトノイズを騒音レベル制御装置 (Noise Level Controller, 森技研 SG-112)に入力し、そのレベルをコントロールした後、増幅器 (Amplifier, SONY-3200F)で増幅して、静電型イヤスピーカー (Ear Speaker, STAX SR-X)で発生させた音を刺激音とした。騒音レベル制御装置は難波らが開発した音刺激制御装置¹⁴⁾を更改したもので、on-time, off-time, 反復回数, 入力源, 減衰量に関する情報をプログラムしておき、入力信号を所定のプログラムに従って変化させる装置である。

刺激音のレベルの監視は、人工耳 (Artificial Ear, Brüel-Kjær, 4153)と精密騒音計 (Precision Sound Level Meter, Brüel-Kjær, 2203)とで行った。

2.2 刺激音

刺激音にはホワイトノイズを用いた。刺激音の1/1オクターブ、1/3オクターブバンド分析の結果をFig. 2に示す。図中に黒丸で示したのが1/1オクターブバンド分析の結果である(オーバーオール音圧レベルは90dB)。一点鎖線で示した直線は3 dB/oct.の傾きを有する直線であり、この直線に対し±2 dBの距離をもつ2本の平行線も併記した。

Fig. 3は刺激音のレベル変動のパターンを模式的に描いた図である。すなわち、刺激音は主としてFig. 3の上図に示すような定常音に立上りと立下りの部分を付し

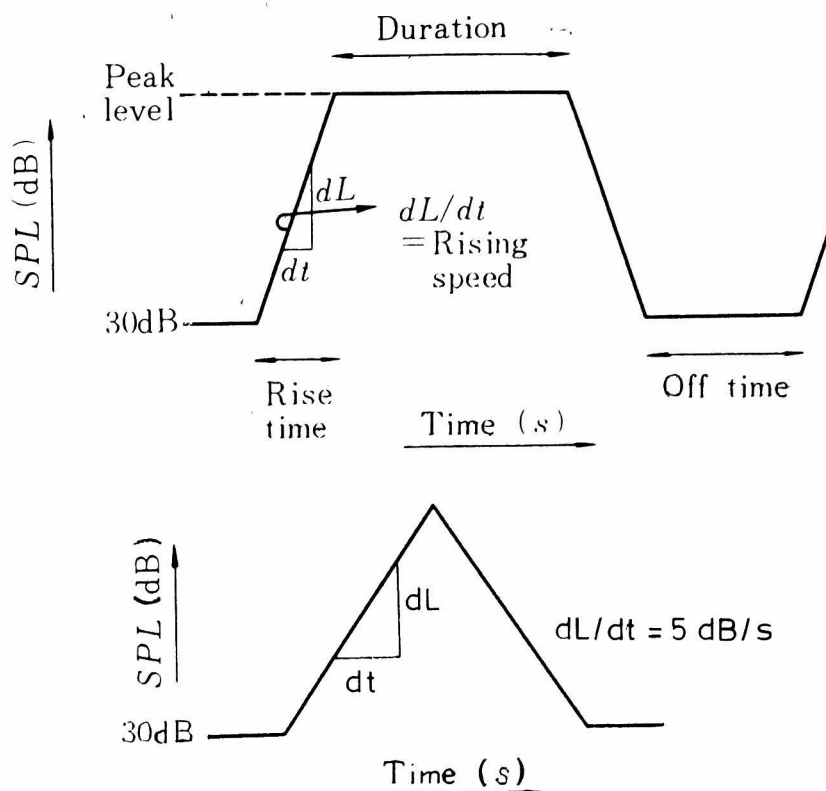


Fig. 3 Idealized time patterns of level changes of stimulus sounds used in the judgement test.

た騒音を用いた（立上りと立下りとは等しくしたので以下簡単のため立上りとのみ記す）。立上りについては、立上り時間（rise time；R.T.）又は立上り速度（rising speed；R.S.）で表現する。前者は 30dB（SPL）からピークレベルに到るまでの時間、後者は単位時間当りのレベルの増加率（dB/s）のことである。また、継続時間（duration）は、ピークレベルが継続する時間（Fig. 3 では台形の上底の部分に相当）のことであり、off-time は、刺激間の時間間隔をいい、その時間における SPL は 30 dB である。

実験に用いた刺激音は Table 1 に示すように、そのピークレベルは 60～90 dB の 4 種を、またピークの継続時間は 30ms～90s の 14 種（計 56 種）を選定した。その他に三角形騒音として Fig. 3 の下図に示すように立上り及び立下り速度が 5 dB/s の騒音でピークレベルが 60, 70, 80, 90 dB の 4 種も付け加えた。

これらの騒音は継続時間が大きく異なっており、かつそれが相当長いものも含まれているので、すべてをランダムに配列して 1 回の実験に含ませれば、実験時間が長くなり、被検者の判定も不安定になると思われる。したがって、30ms～90s の継続時間を、0.03～1s, 1～10s, 10～90s の三つの範囲に分け、それぞれ実験 I, II, III と

した。

実験 I においては、ピークレベルにかかわらず立上り時間（rise time）を 5 ms とし、off time は 2 s とした。実験 II 及び III においては、立上りを音圧レベルが時間とともに直線的に増加するように設定し、その立上り速度（rising speed）を 70 dB/s とした。これは、立上り速度が 70 dB/s の場合、それが 25 dB/s の場合に比べて、うるささの増加がそれと等価な音圧レベルの増加に換算して 1 dB 以下であること¹⁵⁾、及び Kryter⁷⁾ が衝撃音の定義として立上り速度が 40 dB/0.5s より急な音を提唱していることを勘案したからである。off time は実験 II では 5 s, 実験 III では 10 s とした。なお、前述の三角形騒音は実験 II に含めた。

これら三つの実験の結果を一つにまとめることができるように、実験 II において実験 I 及び III に含まれる刺激音を含ませておいた。これは、Table 1 に * 印で示した音で、実験 I と II とで共通な音としてピークの継続時間 1 s, 立上り時間 5 ms の音を、また実験 II と III とで共通な音としてピークの継続時間 10 s, 立上り速度 70 dB/s の音を用いた。

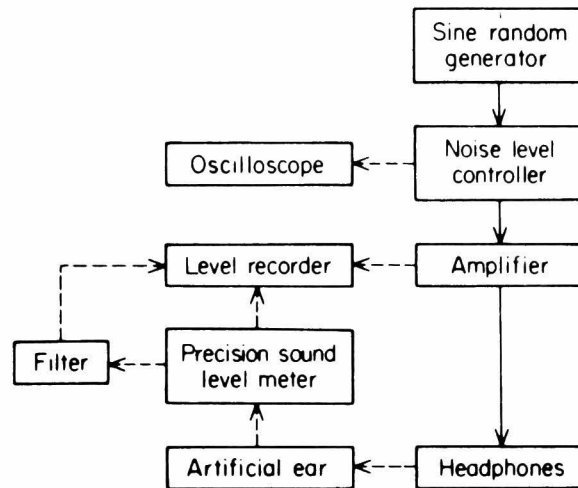


Fig. 1 Block diagram of stimulus-generating and -analyzing equipment. Solid lines indicate generation of stimulus sounds and broken lines indicate analysis of stimulus sounds.

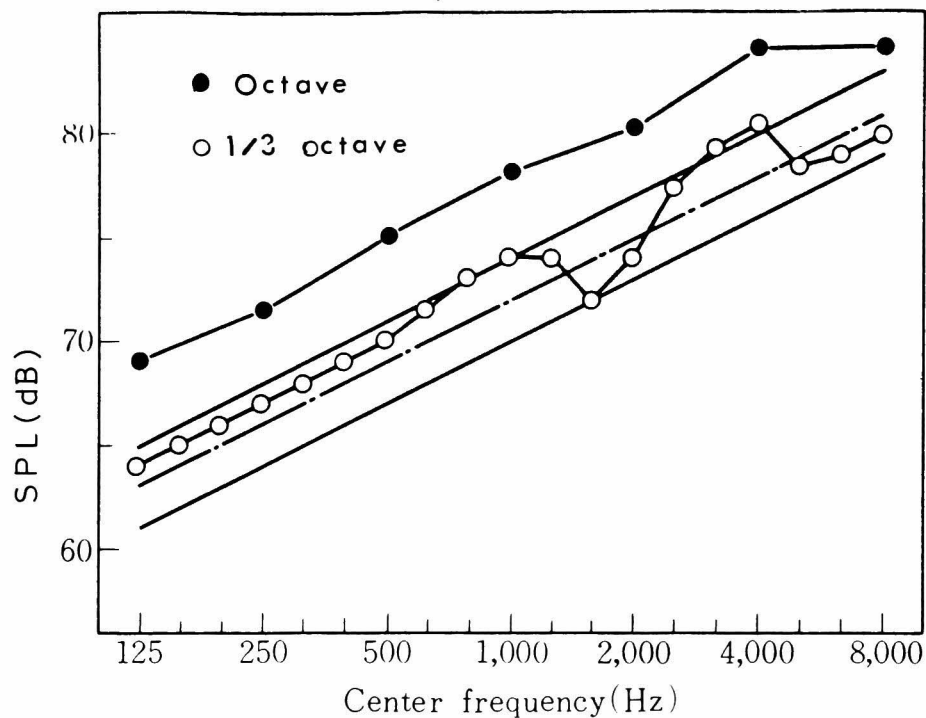


Fig. 2 Octave and 1/3 octave band analysis of stimulus sound (O.A. 90dBA). Solid lines indicate the range of ± 2 dB reference to the chain line of inclination of 3dB/oct.

TABLE I
Some physical characteristics of stimulus sounds used in the experiment

Experiment	Peak level (dB)	Rising part	Duration (s)	Off time (s)
I	60, 70, 80, 90	R.T. = 5 ms	0.03, 0.05, 0.07, 0.1 0.2, 0.5, 1*	2
II	60, 70, 80, 90	R.T. = 5 ms R.S. = 70 dB/s R.S. = 5 dB/s	1* 1, 2, 5, 10** 0	5
III	60, 70, 80, 90	R.S. = 70 dB/s	10**, 20, 30, 50, 90	10

R.T., rise time; R.S., rising speed. Common stimulus sounds which are indicated by asterisks (*, **) are used to interrelate the results of the different experiments.

2.3 刺激音の呈示

実験 I, II, III において, それぞれ Table 1 に示した刺激音をランダムになるように配置して一つの刺激系列を作る。またこれとちょうど逆の順序の系列をも作り, 正逆両順で 1 対とする。こういった刺激系列の対を 5 対作製し, そのうちの 2 対を任意に選んで, 防音室内で被検者 (両耳) に呈示した。したがって各刺激は 1 人の被検者に異なる刺激系列内で, 4 回ずつ呈示されている。刺激系列の対は片寄って選択されることのないように配慮し, 1 人の被検者で連続して 17 分以上実験を行うことのないようにした。

また, 各刺激系列の先頭には, その系列の刺激範囲の中間に位置するような先行刺激を付した。すなわち, 実験 I ではピークの継続時間 0.2s でピークレベルが 75 dB の音を, 実験 II では三角形形状騒音でピークレベルが 75 dB の音を, 実験 III ではピークの継続時間 20s でピークレベルが 75 dB の音を先行刺激とした。刺激強度範囲の中間的な強度の先行刺激を付すと, 強い刺激を過大評価し, 弱い刺激を過小評価する傾向が若干みられるが, 一方先頭の刺激が刺激強度範囲の強弱いずれかの端に位置する場合は, 課題がより困難になると考えられる¹³⁾。今回の実験では課題が相当難しいと予想されたので, これ以上課題が困難になることを避けるため, 上記のような先行刺激を付すこととした。

2.4 うるささの判定

うるささの判定はマグニチュード評価法によった。前節に記したようにして次々と呈示される一連の刺激音に対して, 被検者はその個々の音のうるささを評価し, 点数をつける。この点数は比の値が意味をもつように評価することを被検者に求めた。すなわち, 被検者は, 最初呈示される音のうるささに対して任意の数値を与える。次に呈示される音のうるささが前の音のうるささの 2 倍と判定したなら前の数値の 2 倍の数値を与え, 1/5 と判定したなら 1/5 の数値をつける。これを続けて次々と呈示される音のうるささに対して点数を与えるのである。

音のうるささの判定は, 単に音が大きい小さいだけでなく, 耳障りであるとか, 不快であるとか, びっくりしたといった感じをも含めて, 総合的な感じから評価するよう被検者に指示した。また, duration cue は与えている。その理由は, この種の刺激音を用いた実験においては, duration cue を与えなくとも, 被検者は, duration が異なっていることを容易に察知すると思われ, かえって被検者によって duration に対する態度が不統一になるとも考えられるので, これを統一することを期したためである。

2.5 被検者

聴力正常な 20 才台の男女学生各 10 名ずつ, 計 20 名を選定し, 被検者とした。

各被検者は, 本実験に入る前に比の感覚の把握及び評点の仕方の練習のために 10 数種の長さの線分で 10~20 回程度 magnitude estimation 及び magnitude production の練習を行い, 更に 60~90 dB の範囲の騒音をも用いて同様の練習を行った。

3. 実験結果

各被検者の各々の試行について, ピークレベル 80 dB, ピークの継続時間 10s の音のうるささを 1 として他の刺激音のうるささの比の値を計算し, これを全被検者について幾何平均 (以下, 比の値の平均は幾何平均を用いる) した結果を Fig. 4 に示した。図において黒丸でプロットしたのは立上り時間を 5 ms にした音, 白丸でプロットしたのは立上り速度を 70 dB/s にした音であることを示している。5 ms という立上り時間は, 立上り速度に換算すれば, 例えばピークレベルが 80 dB の音については 10,000 dB/s となり, 70 dB/s の立上り速度を有する音に比べてうるささの差は, それと等価な音圧レベルに換算して約 3 dB 程度であると予測¹⁵⁾され, ピークの継続時間 1s の場合の黒丸と白丸との差に近い値となっている。したがって立上りの効果を補正するため各ピークレベルごとにピークの継続時間 1s において黒丸で示した値が

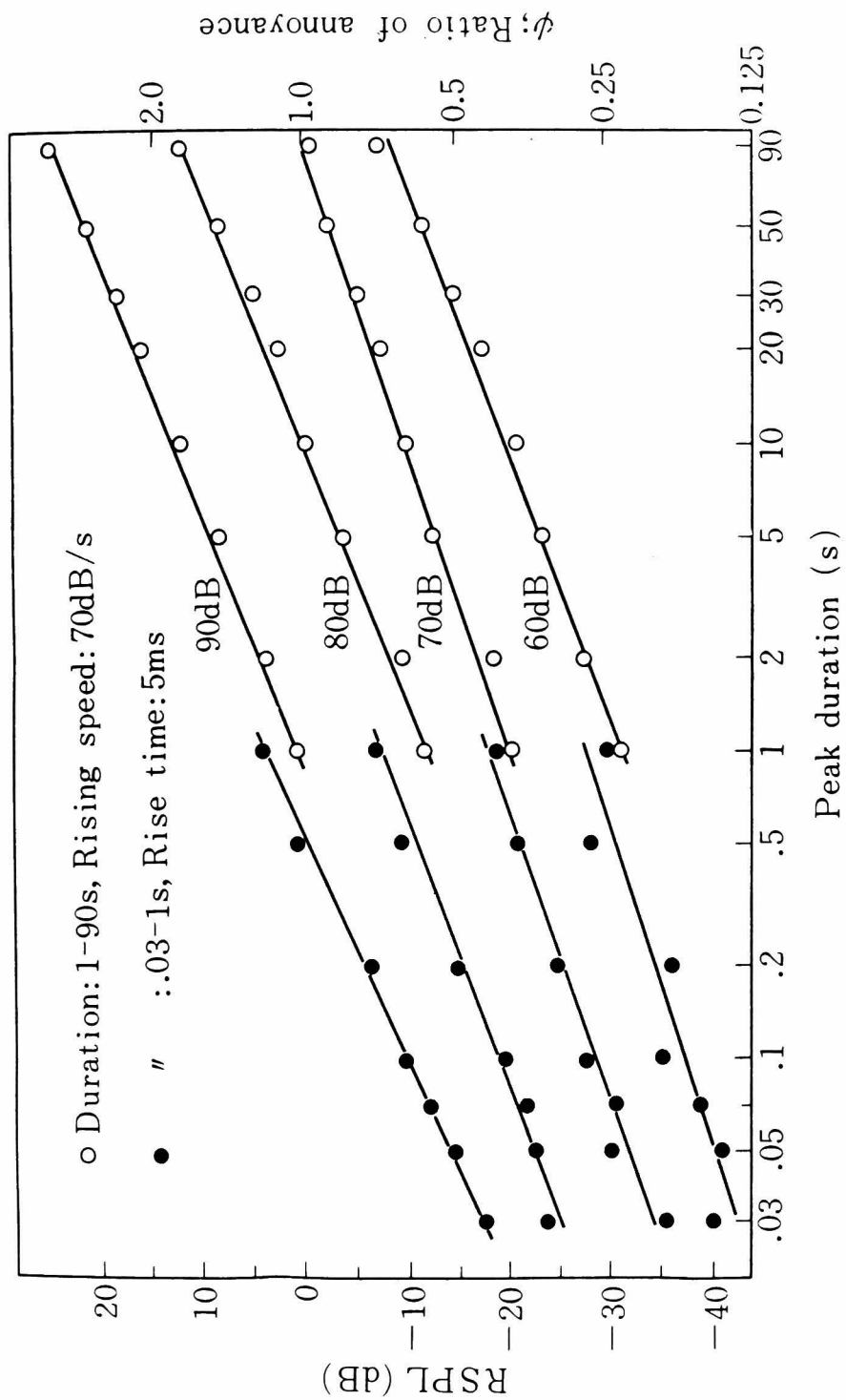


Fig. 4 Magnitude estimates of the noise perception as functions of stimulus duration.
Solid circles denote the sounds with rise time of 5ms and open circles denote those with the rising speed of 70dB/s.

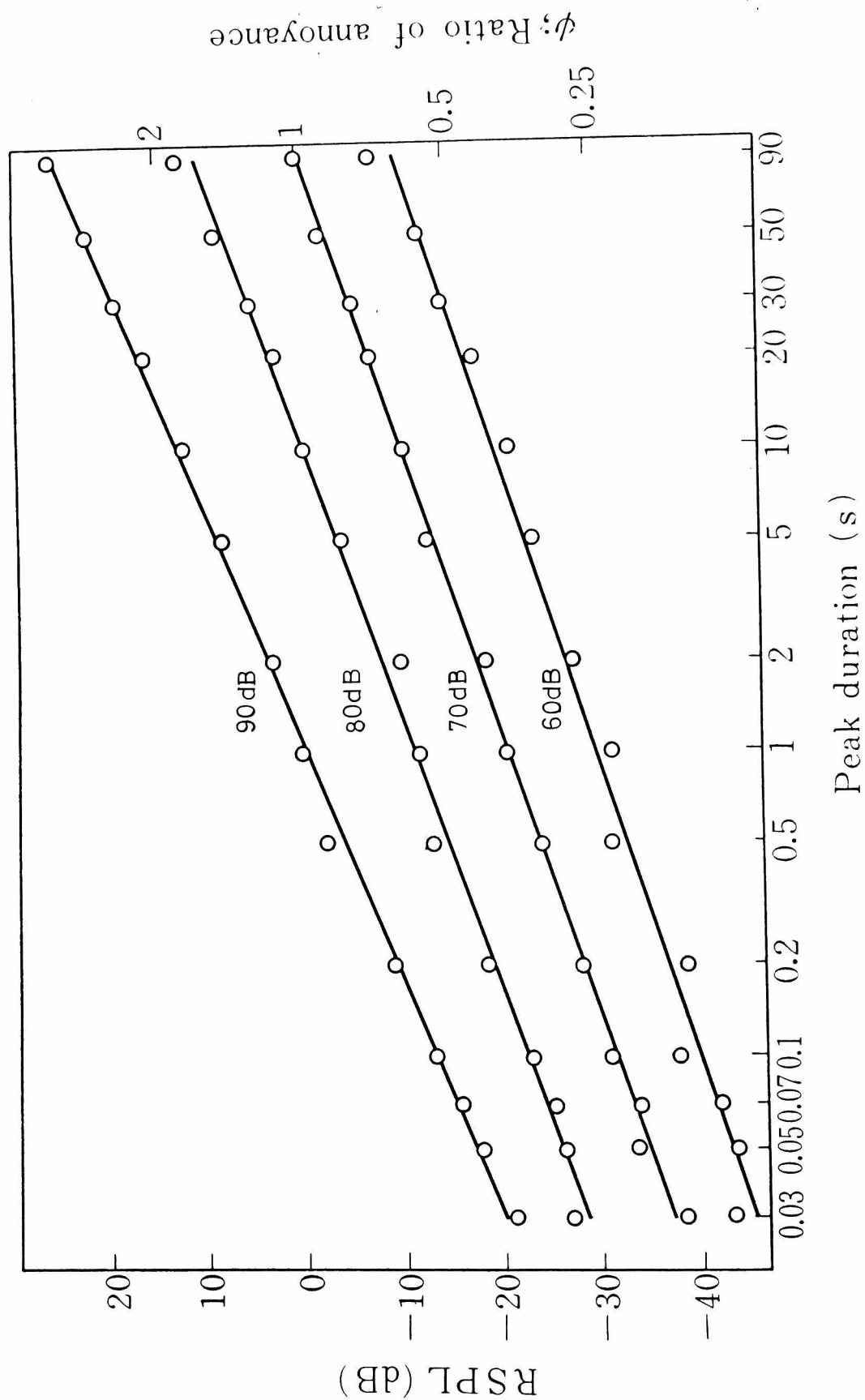


Fig. 5 Magnitude estimates corrected for the rising parts of stimulus sounds shorter than 1000ms.

白丸で示した値に一致するよう黒丸の値を平行移動させることによって修正した。こうして得た結果をプロットしたのが Fig. 5 であり、これを今回の実験データとして解析する。

Fig. 5 において引いた実線は、各ピークレベルごとに最小自乗法であてはめた回帰直線である。これらの直線の回帰係数は、ピークレベル 60, 70, 80, 90 dB の各々について、0.206, 0.219, 0.228, 0.264 であった。この 4 本の回帰直線の回帰係数は、互いに近い値となっているので、今、これらの直線が平行であるとして、うるささの比 ψ の対数が、ピークレベル L (dB) と、ピークの継続時間 t (s) とによって、

$$\log \psi = p \log t + qL + r, \quad (1)$$

で表されると仮定し、重回帰分析を行って定数 p , q 及び r を求めた。すなわち、次式となる。

$$\log \psi = 0.229 \log t + 0.0203 L - 1.842 \quad (2)$$

Fig. 8 に一点鎖線で示した直線は、(2)式の L に各ピークレベルの値を代入して引いた直線である。

今の場合、 L と t とは実験条件として独立に選べるから、 $\partial \log \psi = 0.229 \partial \log t$, あるいは $\partial \log \psi = 0.0203 \partial L$ が成立する。すなわち、うるささが 2 倍になるためにはピークの継続時間が約 20.6 倍になる必要があり、あるいはピークレベルが 14.8 dB 増加しなければならない。この関係を図示するため、Fig. 5 の結果について各ピークレベルごとにうるささの比の平均値を求め、それをピークレベルに対してプロットしたのが Fig. 6 であり、同

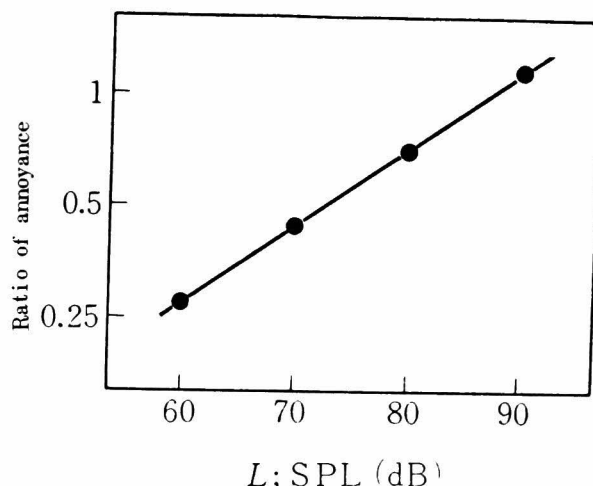


Fig. 6 Average ratio of annoyance (ψ) vs. peak level (L).

$$\partial \log \psi = 0.0203 \partial L.$$

The relation is obtained from equation (2). If the ratio of annoyance, ψ , becomes twice as large, $\partial \log \psi$ is 0.301. Then, ∂L becomes 14.8.

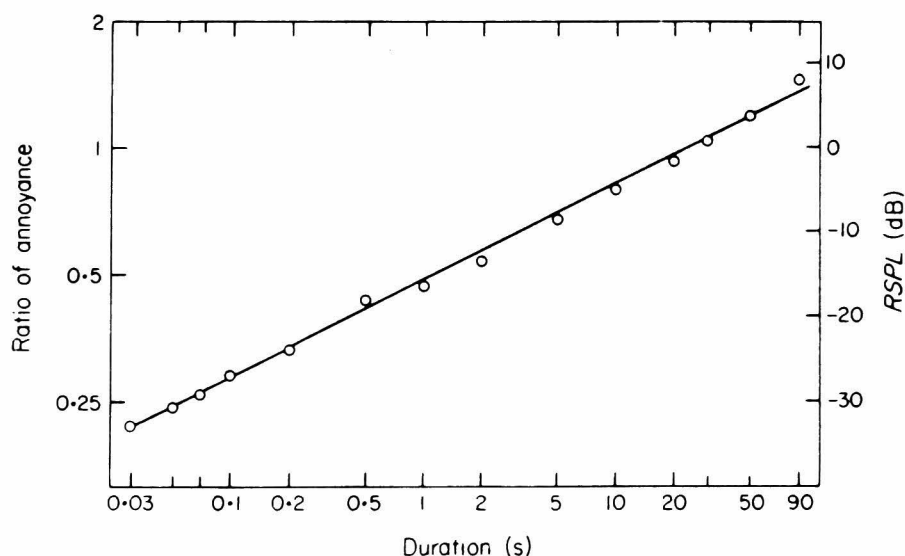


Fig. 7 Average ratio of annoyance (ψ) vs. duration (t).

$\partial \log \psi = 0.229 \partial \log t$. The average slope of duration effect is 3.4 dB/doubling.

じく各継続時間ごとにうるささの比の平均値を計算し継続時間に対してプロットしたのが Fig. 7 である。 ϕ と L との関係 (Fig. 6) から、うるささの比に対応する相対音圧レベル (RSPL) を計算し、 $\phi=1$ の時 RSPL=0 dB となるようにして、Fig. 4 及び 5 の左の縦軸に RSPL を示した。

なお、継続時間とうるささとの関係を duration effect (dB/doubling) で表現すれば、約 3.4 dB/doubling となる。

Fig. 5 に示した 4 本の回帰直線の回帰係数は、いずれも同程度の値であるが、ピークレベルの増加とともに回帰係数の値も大きくなっている。ピークレベルが 60 dB と 90 dB の場合について両回帰係数の差を検定した結果、両回帰係数間に有意な差があった (有意水準; 0.05)。したがって、継続時間がうるささに及ぼす効果はピークレベルによって異なるとも考えられるので、今回の実験で得られた結果について、

$$\log \phi = aL \log t + b \log t + cL + d, \quad (3)$$

が成立すると仮定し、重回帰分析を行って、定数 a , b , c , d を求めた。すなわち、次式を得た。

$$\log \phi = 0.0018L \log t + 0.091 \log t + 0.020L - 1.817. \quad (4)$$

Fig. 8 に示した実線は、(4)式の L に各ピークレベルを代入して引いた直線である。

(4)式は(2)式より説明変数が増えているので、両式のあてはまりの程度を検討するため、各々の場合について、自由度調整済みの重相関係数を計算した結果、(2)式の場合、0.990、また(4)式の場合、0.994と、いずれの場合も高い値であるが、後者の方がより高い値となっている。更に $L \log t$ の偏回帰係数を検定した結果有意であった (有意水準; 0.05)。

このモデルに対して20人の被検者の4回の反復データが得られているが、これを各被検者ごとに平均し、被検者1人について一つのデータが得られたとして、モデルの適合度の検定を行った。すなわち、(4)式で計算される $\log \phi$ の値を Y_k 、その時の被検者 i の判定結果を y_{ki} とすると、

$$\sum_{k=1}^{56} \sum_{i=1}^{20} (y_{ki} - Y_k)^2 = \sum_{k=1}^{56} \left\{ \sum_{i=1}^{20} (y_{ki} - \bar{y}_k)^2 + 20 \times (\bar{y}_k - Y_k)^2 \right\}, \quad (5)$$

$$\text{ここに、} \bar{y}_k = \sum_{i=1}^{20} y_{ki} / 20.$$

今、

$$S_r = \sum_{k=1}^{56} \sum_{i=1}^{20} (y_{ki} - \bar{y}_k)^2, \quad (6)$$

$$S_{lof} = 20 \sum_{k=1}^{56} (\bar{y}_k - Y_k)^2, \quad (7)$$

とくと、この S_r 及び S_{lof} に対応する自由度は、それ

ぞれ $56 \times (20-1)$ と $56-3-1$ であるから、

$$F = \frac{S_{lof}/52}{S_r/1064} = 0.736 < 1.54 = F(52, 1064; 0.05),$$

となり、モデルは不適合とは認められない¹⁶⁾。

また、(4)式に示した重回帰式において、 $x_1 = L \log t$, $x_2 = \log t$, $x_3 = L$ とおき、それらの特定の値を x_{01} , x_{02} , x_{03} とすると、点 (x_{01}, x_{02}, x_{03}) における $\log \phi$ の母平均 η_0 の95%信頼限界は、

$$\eta_0 : Y_0 \pm t(52; 0.05) \sqrt{\left(\frac{1}{56} + D_0^2 \right) \times \frac{S_e}{52}}, \quad (8)$$

で表される¹⁶⁾。ただし、 Y_0 は(4)式に (x_{01}, x_{02}, x_{03}) を代入した時の $\log \phi$ の値、 $t(52; 0.05)$ は自由度52の t 分布の5%点の値、 $S_e = \sum_{k=1}^{56} (\bar{y}_k - Y_k)^2$ である。また、 D_0 はマハラノビスの汎距離で、次式で定義される。

$$D_0^2 = \sum_{h=1}^3 \sum_{h'=1}^3 (x_{0h} - \bar{x}_h)(x_{0h'} - \bar{x}_{h'}) S^{hh'}, \quad (9)$$

ここに \bar{x}_h は x_h の平均値、 $S^{hh'}$ は、 x_1, x_2, x_3 の偏差平方和積和行列の逆行列の (h, h') 要素である。すなわちこの逆行列を S^{-1} と書くと、

$$S^{-1} =$$

$$\begin{pmatrix} 2.680 \times 10^{-5} & -2.010 \times 10^{-3} & -4.696 \times 10^{-6} \\ -2.010 \times 10^{-3} & 1.514 \times 10^{-1} & 3.522 \times 10^{-4} \\ -4.696 \times 10^{-6} & 3.522 \times 10^{-4} & 3.654 \times 10^{-5} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

また、 \bar{x}_h ($h=1, 2, 3$) は、

$$(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3) = (13.1387, 0.175182, 75). \quad (11)$$

Fig. 9 に各ピークレベルの値を(4)式に代入して引いた回帰直線と、その95%信頼限界を示す。

一方、EPNL で採用されているように、継続時間の効果を $10 \log t$ として評価することも時に行われている。今回の実験結果に対して、この方法を適用すれば、

$$\log \phi = A(L + 10 \log t) + B, \quad (12)$$

が仮定される。ただし、 A 及び B は定数。 L と ϕ の関係として $\partial \log \phi = 0.0203 \partial L$ を導入すれば、 $A=0.0203$ となり、この時(12)式がデータにもっともよく合うように B を決定し、次式を得た。

$$\log \phi = 0.0203(L + 10 \log t) - 1.856. \quad (13)$$

Fig. 8 の点線は、(13)式の L の値に各ピークレベルを代入して引いた直線である。実線 ((4)式) に比べて点線 ((13)式) はデータから若干はずれており、特にピークレベルが高く、継続時間の長い場合にその傾向が強い。

実験は、各被検者が各刺激音を4回ずつ判定しているもので、これを4回の反復実験が独立に行われたとし、反復による誤差が被検者によって変わらないとすると Fig. 4 に示した各点、すなわち各刺激音に対する判定の母平均 μ の95%信頼限界は、次式で表される¹⁷⁾。

$$\begin{aligned} \bar{x} + t(19; 0.05) \sqrt{\frac{v_A^2}{4 \times 20}} &> \mu > \\ \bar{x} - t(19; 0.05) \sqrt{\frac{v_A^2}{4 \times 20}} & \end{aligned} \quad (14)$$

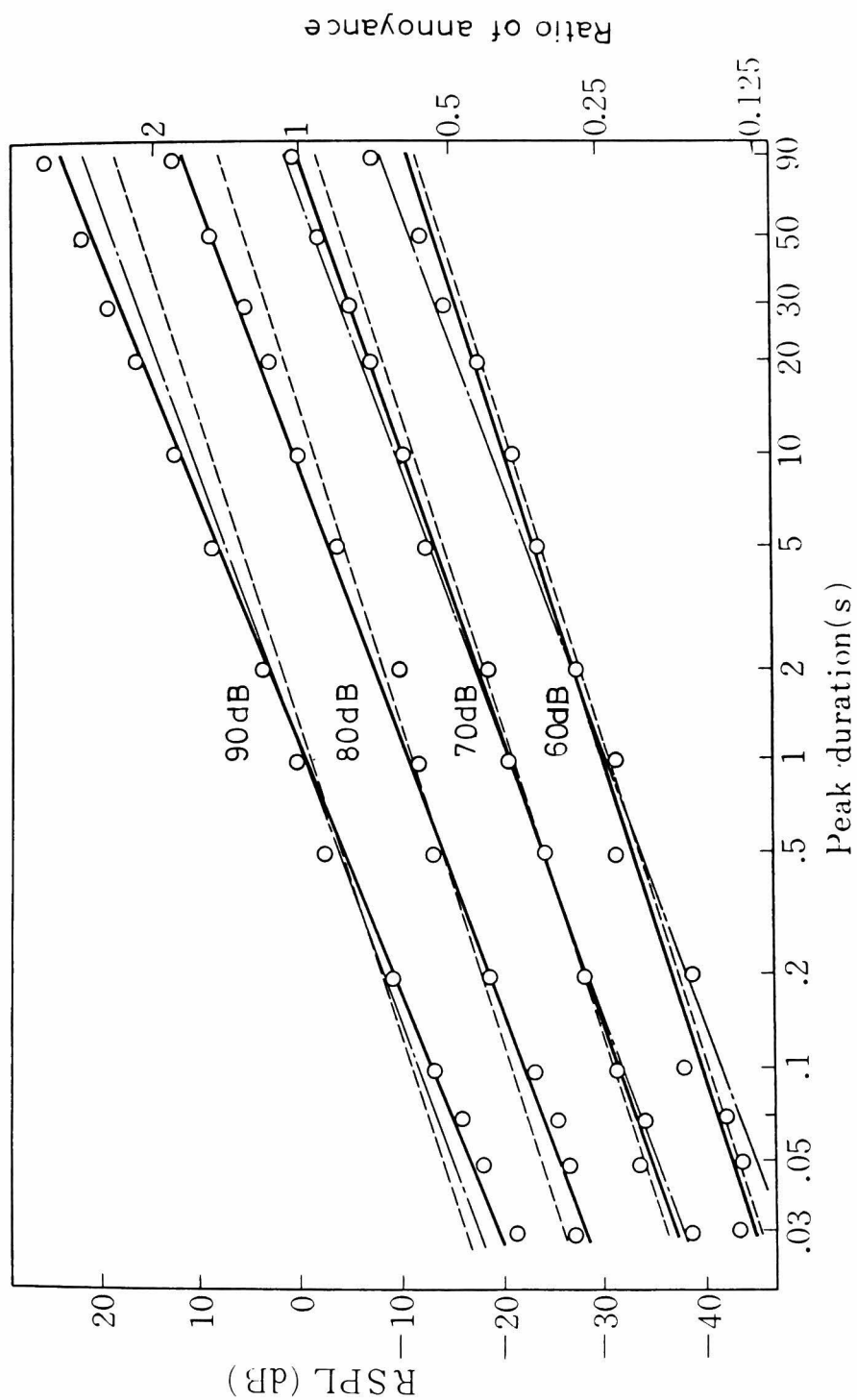


Fig. 8 Comparison of regression lines with experimental results.

— $\log\psi = aL\log t + b\log t + cL + d$

- - - $\log\psi = A(L + 10\log t) + B$

· · · $\log\psi = p\log t + qL + r$

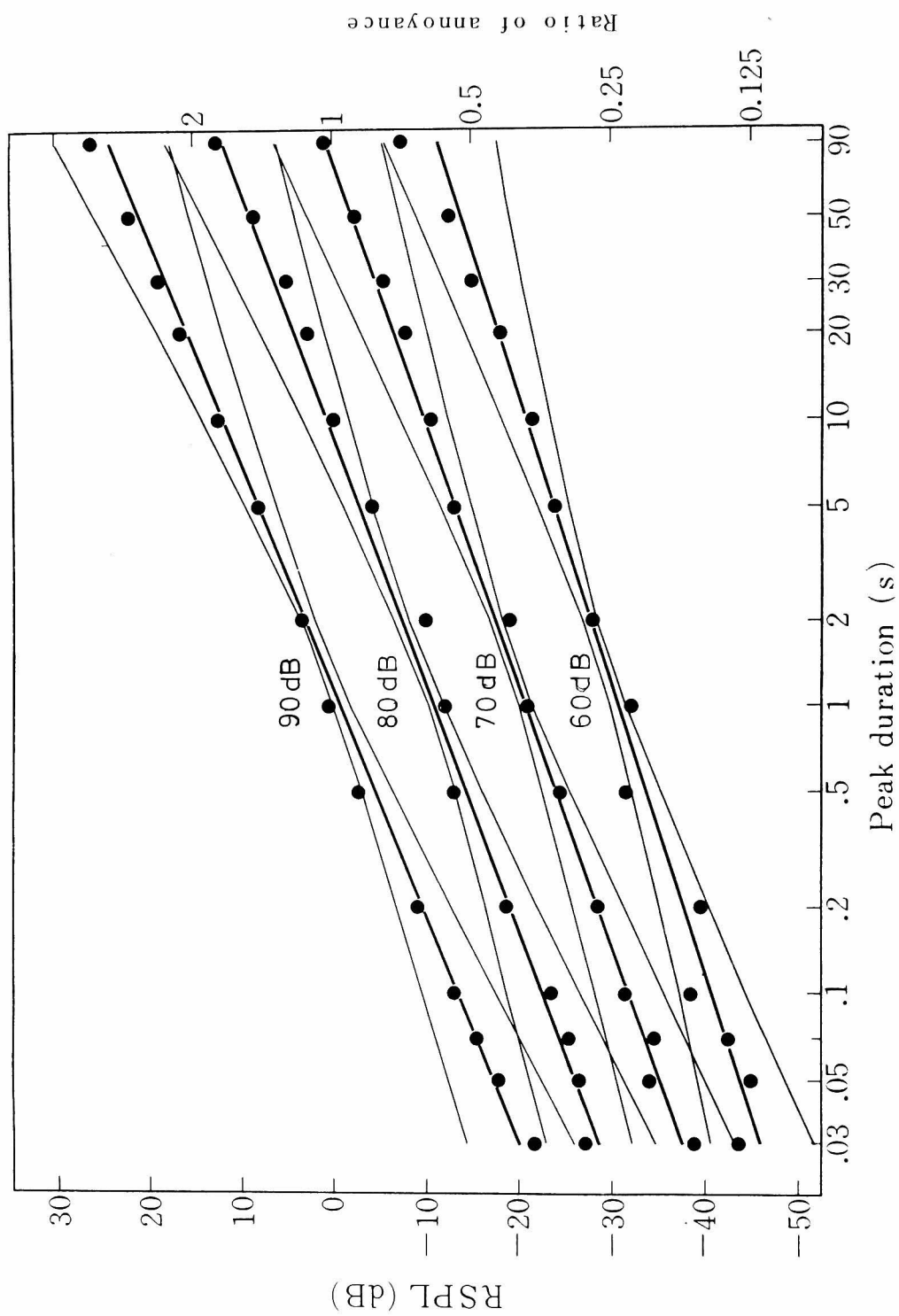


Fig. 9 Regression lines obtained by substituting the values of peak levels to equation (4) and corresponding 95% confidence limit of the lines.

ただし,

$$v_i^2 = \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{20} \left\{ \sum_{j=1}^4 x_{ij}/4 - \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{20} x_{ij}/80 \right\}^2 / 19, (15)$$

ここに, x_{ij} は i 被検者の j 番目の判定結果, 4 は反復回数, 20 は被検者数, $\bar{x} = \sum_{j=1}^4 \sum_{l=1}^{20} x_{ij}/80$, $t(19; 0.05)$ は自由度 19 の t 分布の 5% 点の値である。

実際のデータでは, この信頼限界の幅は刺激音のピークレベル及び継続時間によって異なった値を示しているが, その平均値は 0.067 であり, これは RSPL では, 約 3.3 dB に相当する。

各音圧レベル並びに継続時間別に計算した $\log \psi$ の平均値と, その信頼限界を Appendix として表に示した。

4. 考 察

4.1 反復及び男女による違い

既に述べたように, 今回の実験は, 4 回反復して実験を行ったとみなし得る。4 回の反復といっても, 刺激音の呈示順序等はランダムになるように配慮しているが, なお, 馴れ等のため, 反復回数が増すにつれて判定が変

Table 2 Analysis of variance table for testing the differences between regression lines of four trials.

Variation due to	D. fr.	SS	Mean square	F
Total	223	27.8230		
Total regression	3	27.3715		
Difference of constants	3	0.0103	0.003433	1.69
Difference of regression coefficients	9	0.0312	0.003467	1.76
Residual	208	0.4100	0.001971	
Pooled residual	217	0.4412	0.002033	

$F(0.05; 9, 208) = 1.92$, $F(0.05; 3, 217) = 2.64$

る可能性も考えられる。この点について検討するため, (3) 式で仮定した重回帰式に第 1 回～第 4 回までの各試行の結果をあてはめて四つの重回帰式をあてはめた場合と, (4) 式のように一つの重回帰式を得た場合とで有意な差が認められるかどうかを検定した。**Table 2** にその分散分析表を示す。表からわかるように, 4 回の反復について共通の重回帰式を用いても, その差は有意ではないので, 今回の実験においては 4 回の反復による被検者の判定結果の変動は有意ではないと言える。

同様に男女による違いを検定した結果, 重回帰式の定数項に男女によって有意な差が認められた (分散分析表を **Table 3** に示す)。

これよりただちに男女によってうるささの判定に差が

Table 3 Analysis of variance table for testing the difference between regression lines of male and female subjects.

Variation due to	D. fr.	SS	Mean square	F
Total	111	13.8686		
Total regression	3	13.6918		
Difference of constants	1	0.00695	0.00695	4.37
Difference of regression coefficients	3	0.00526	0.00175	1.11
Residual	104	0.1646	0.00158	
Pooled residual	107	0.1699	0.00159	

$F(0.05; 3, 104) = 2.74$, $F(0.05; 1, 107) = 3.93$

あると結論づけるのは早計であろうが, 現段階では被検者の選定において, 男女両性共採用することが望ましいと思われる。

4.2 臨界継続時間(critical duration)について

継続時間が 1 s 以下の音のラウドネスと継続時間との関係においては既に述べたように臨界継続時間 (約 200 ms) が存在するのが通常である。しかし, 今回筆者が行った実験の結果では, **Fig. 4** の黒丸でみてわかるように明瞭な臨界継続時間は存在していない。その理由としては, 筆者はマグニチュード評価法を用いたことが主たる原因であると考えている。

これに関連して, 類似の実験方法によって得られた従来の成績をみると, 1000 Hz の純音を用いて, 50～500 ms の duration でマグニチュード評価法によって実験を行った Ekman et al.¹⁸⁾ の結果では臨界継続時間は明瞭ではない。比率評定法 (ratio estimation) によって同様な実験を行った Gustafsson¹⁹⁾ 及びマグニチュード評価法による実験を行った McFadden²⁰⁾ の両実験結果においても臨界継続時間はみられない。Berglund et al.²¹⁾ が 1000 Hz の純音を用いて 30～2000 ms の duration で, ラウドネスと finger span とのクロスモダリティー・マッチング (異種感覚様相間のマッチング) を行った結果では, 臨界継続時間は 600～1000 ms と通常みられる範囲 (100～500 ms) より長くなっている。また, J. C. Stevens et al.²²⁾ は 5～500 ms の範囲の noise burst を用いてマグニチュード評価法による実験を行い, データの解析に際して, 臨界継続時間=150 ms を *a priori* に導入しているが, 実験データからは強いて臨界継続時間を導入しなくてもよいと思われる結果となっている。

このように, マグニチュード評価法等の直接的な評価法を用いた場合には, 多くは臨界継続時間が明瞭でないか, みられる場合でも 1000ms 付近においてみられている。したがって, 今回得られた実験結果において臨界継

続時間がみられない理由も、マグニチュード評価法によったためと考えられる。マグニチュード評価法によった場合なぜ臨界継続時間が明瞭にみられないかという点は、今後検討すべき課題である。

なお、duration cue を与えたために臨界継続時間が明瞭でなくなったとも考えられるが、duration が 1 s 以下の音のラウドネスに関して、duration cue の有無による成績の違いを論じた報告を筆者は知らない。

4.3 継続時間と心理量について

(2)式から、

$$d \log \phi = 0.229 d \log t + 0.0203 d L, \quad (16)$$

と書ける。今、音の強さ I (watt/m²) と L (dB) との関係が、

$$L = 10 \log_{10} (I/I_0) \quad (I_0 = 10^{-12} \text{ watt/m}^2), \quad (17)$$

であることを考えると(16)式から、

$$\phi = C t^{0.229} I^{0.203}, \quad (18)$$

という関係が得られる。ただし、 C は定数。

(18)式の右辺の I のべきの値はほぼ 0.33 になることが知られているが³⁰⁾、今回の結果では 0.203 と小さい値になっている。これは、課題の困難さ²²⁾ 及び回帰効果²³⁾ によるためと考えられる。したがって、J. C. Stevens et al.²²⁾ が行っているように、 I のべきの値を 0.33 として、 t のべきの値をも修正すれば、

$$\phi = C' t^{0.37} I^{0.33}, \quad (19)$$

という関係が得られる。

S. S. Stevens²³⁾ が、ホワイトノイズの呈示時間によって duration のべきを測定した結果では、1.1 というべきの値が得られており、今回の実験で得られた値と大きく異なっている。この事実は、今回の実験において、被検者が刺激音の継続時間を時間知覚として把握したのではなく、刺激音のうるさを総合的に評価した一証左とみなし得るものであろう。

4.4 等うるささ線

(2)式、(4)式及び(13)式で、 $\phi = \text{一定}$ とし、 L について解けばうるさが等しい時の L と t との関係が得られる。

Fig. 10 の一点鎖線は(2)式から、実線は(4)式から、また点線は(13)式から得られた等うるささ線であり、図中のパラメータは ϕ の値を示している。 ϕ の値が大きくなるにつれて実線と点線との隔りは大きくなる傾向にある。

Fig. 10 の等うるささ線は、「sensory physical な関係」と呼ばれており、回帰効果の影響が比較的少ないとされている²⁴⁾。

また、Fig. 10 の実線は双曲線となっており、1節で記述した duration effect はこの双曲線の微係数によって表される。今、 $\phi = 0.68$ の場合についてこれを計算すると、 $t = 1$ s で 4.8 dB/doubling、 $t = 10$ s で 4.0 dB/doubling、 $t = 100$ s で 3.4 dB/doubling である。このように継続時間によって duration effect に違いが生じるかのような結果となっているが、これは「ピークレベルによって継続時間がうるさに及ぼす効果が異なる。」とした

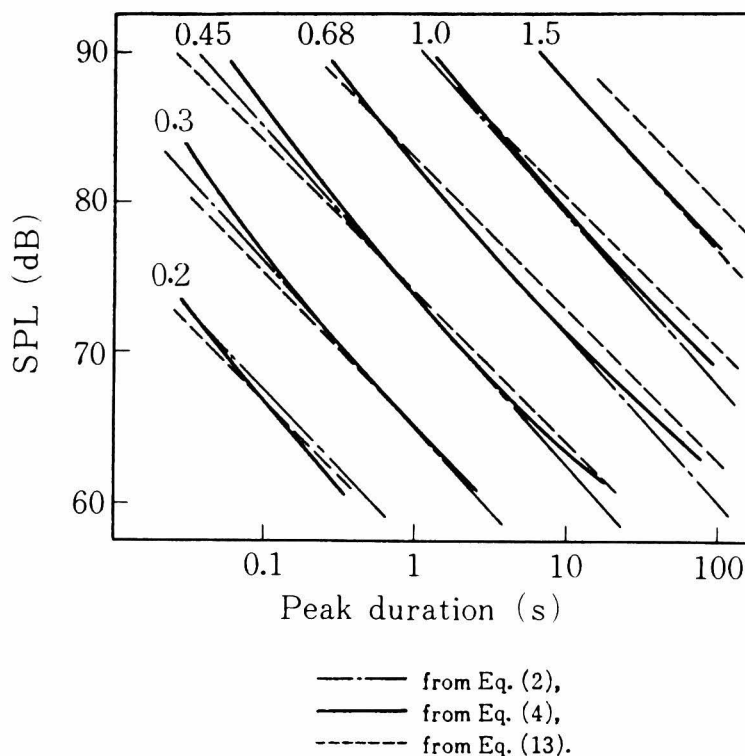


Fig.10 Equal annoyance contours. Parameter is ratio of annoyance.

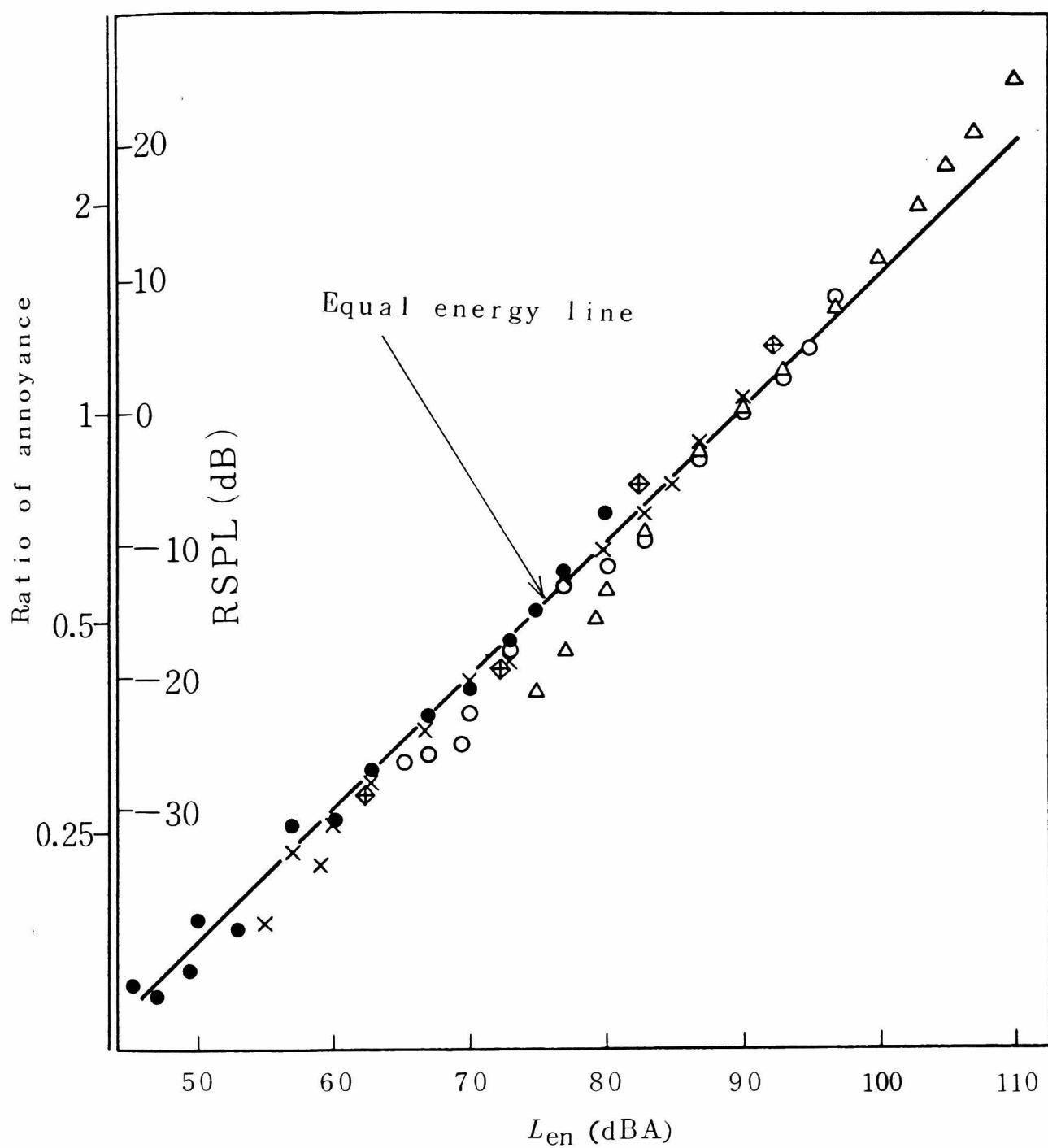


Fig. 11 Relation between L_{en} and annoyance.

Δ , 90dB; \circ , 80dB; \times , 70dB; \bullet , 60dB; \blacklozenge , triangular noise.

ためであって、今回の結果についてみれば、例えばFig. 7 からわかるように、 ϕ は $\log t$ に比例して一定の割合で増加しており、継続時間の長さによって、継続時間の効果が異なることはない。したがって、継続時間によってduration effect が異なるとする報告^{4),9)}は、継続時間がうるささに及ぼす効果がピークレベルによって異なるという事実を反映した結果であるとも考えられ、なお検討の余地がある。

4.5 騒音のエネルギーとうるささ

騒音のうるささが、騒音のエネルギーに比例するとする考え方は、騒音のエネルギーが比較的測定し易いこと、*a priori* に認められやすいことなどもあって、よく採用されている。これは、筆者が今回用いた実験条件ではduration effect を 3dB/doubling とみなすこと、あるいは(12)式を仮定することにも相当する。今回の実験結果と騒音のエネルギーとの関係をみるため、暴露される騒音のエネルギーのdB表示として、香野、曾根、二村¹⁰⁾にならって L_{en} (dB) を採用し、これを横軸にとって、実験結果をFig. 11 にプロットした。ここに L_{en} は次式で定義されている。

$$L_{en} = 10 \log_{10} \int_0^T 10^{\frac{L(\tau)}{10}} d\tau \quad (20)$$

ただし、 T は騒音の全継続時間、 $L(\tau)$ は時刻 τ におけるレベル。なお、 L_{en} は航空機騒音の表示にならってTNEL(Total Noise Exposure Level in dB)としてもよいであろう。

Fig. 11 には、実験Ⅱに用いた三角形騒音の結果をも含めてある。図中に引いた直線は、 $L_{en}=90$ dB, RSPL=0 dB の点を通り、傾き=1 の直線で、騒音のうるささがそのエネルギーに完全に比例する場合に成立する関係を示しており、いわば等エネルギー線である。また、Fig. 11 の成績には、Fig. 4 の黒丸の成績に立上りの補正をした後の成績、すなわちFig. 5 成績を用いている。

Fig. 11 においては、うるささが L_{en} によく比例しているが、一方図中の等エネルギー線に比べて、特にピークレベルが 90 dB の場合、そのくい違いが大きく、 L_{en} が 75~80 dB の範囲では、等エネルギー線より下方に、 L_{en} が約 100 dB 以上では等エネルギー線より上方に位置している。すなわち、 L_{en} の大きい場合には直線から 5 dB 近く危険側の結果となっている。今回の実験結果でみる限り、 L_{en} で騒音のうるさを評価する場合には高レベル長時間の騒音については注意を要すると言えよう。

5. 要 約

白色騒音のレベルを 60~90 dB の 4 種選び、その継続時間を 30 ms から 90 s まで 14 種選定して、男女各 10 名、計 20 名の被検者に 4 回ずつ判定させ、マグニチュー

D 評価法でうるささの測定を行った。

その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 30 ms から 90 s までうるさは継続時間の対数に比例して増加する。
- (2) 継続時間が 2 倍になった場合、うるささの増加は平均的にみて、音圧レベルの 3.4 dB の増加と等価である (3.4 dB/doubling)。
- (3) 継続時間の効果は騒音のレベルによって若干異なりレベルが高くなる程効果も大きくなる。
- (4) 継続時間が 20.6 倍、あるいはピークレベルが 14.8 dB 増加すればうるさは約 2 倍となる。
- (5) 継続時間の効果を $10 \log t$ で評価した場合、高レベル長時間の刺激音について、予測値と実験値の隔りが著しい。
- (6) 4 回の実験の反復によっては、有意な判定の差は認められない。
- (7) 男女による差は若干認められた。
- (8) レベルと継続時間の交互作用を考慮した場合、等うるさを示すコンターは双曲線となる。このため継続時間の長さによって継続時間の効果が、みかけ上は異なるかのような結果となる。

参 考 文 献

- 1) von G. Békésy : Zur Theorie des Hörens, Physik. Zeitschr., 30 (1929) S. 115
- 2) A. Mirabella, H. Taub, and W.H. Teichner : Adaptation of Loudness to Monaural Stimulation, J. General Psychol., 76 (1967) p. 251
- 3) K.D. Kryter and K.S. Pearsons : Some Effects of Spectral Content and Duration on Perceived Noise Level, J. A. S. A., 35 (6) (1963) p. 866
- 4) K.S. Pearsons : The Effect of Duration and Background Noise Level on Perceived Noisiness, FAA-ADS-78 (1966)
- 5) K.S. Pearsons and R.L. Bennett : The Effects of Temporal and Spectral Combinations on the Judged Noisiness of Aircraft Sounds, FAA-NO-69-3 (1969)
- 6) K.S. Pearsons and R.L. Bennett : Effects of Temporal and Spectral Combinations on the Judged Noisiness of Aircraft Sounds, J. A. S. A., 49 (4) (1971) p. 1076
- 7) K.D. Kryter : The Effects of Noise on Man, (Academic Press, N. Y. 1970)
- 8) J.B. Ollerhead : Scaling Aircraft Noise Perception, J. Sound Vib., 26 (3) (1973) p. 361
- 9) H. Sternfeld, Jr., E.G. Hinterkeuser, R.B. Hackman, and J. Davis : Acceptability of VTOL Aircraft Noise Determined by Absolute Subjective Testing, NASA-CR-2043 (1972)
- 10) 香野、曾根、二村 : 鉄道騒音のうるさに関する考察、日音会誌, 29 (4) (1973) p. 225
- 11) J.W. Little and J.E. Mabry : Sound Duration and Its Effect on Judged Annoyance, J. Sound Vib., 9 (2) (1969) p. 247

- 12) H. J. Parry and J. K. Parry : The Interpretation and Meaning of Laboratory Determinations of the Effect of Duration on the Judged Acceptability of Noise J. Sound Vib., 20 (1) (1972) p. 51
- 13) S. S. Stevens : The Direct Estimation of Sensory Magnitudes—Loudness, Amer. J. Psychol., 69 (1956) p. 1
- 14) 難波, 中村, 安田 : 音刺激制御装置の試作, 心研, 43 (6) (1973) p. 307
- 15) 平松, 高木, 山本, 池野 : 騒音の立ち上がりうるささに及ぼす効果, 日音会講論集 (1975. 5) p. 3
- 16) 奥野, 久米, 芳賀, 吉沢 : 多変量解析法, 日科技連 (1971)
- 17) 舟阪, 近藤 : 技術者のための統計的方法, 共立 (1967)
- 18) G. Ekman, B. Berglund, and U. Berglund : Loudness as a Function of the Duration of Auditory Stimulation, Scand. J. Psychol., 7 (1966) p. 201
- 19) B. Gustafsson : The Loudness of Transient Sounds as a Function of Some Physical Parameters, J. Sound Vib., 37(3) (1974) p. 389
- 20) D. McFadden : Duration-Intensity Reciprocity for Equal Loudness, J. A. S. A., 57 (3) (1975) p. 702
- 21) B. Berglund and U. Berglund : A Further Study of the Temporal Integration of Loudness, Rep. from Psychol. Lab., Univ. Stockholm, No. 229 (1967)
- 22) J. C. Stevens and J. W. Hall : Brightness and Loudness as Functions of Stimulus Duration, Perception and Psychophysics, 1 (1966) p. 319
- 23) S. S. Stevens and H. B. Greenbaum : Regression Effect in Psychophysical Judgement, Perception and Psychophysics, 1 (1966) p. 439
- 24) L. E. Marks : Sensory Processes, (Academic Press, N. Y. 1974)

Appendix Means and 95% confidence limits (C. L.) of $\log \psi$ of male (M), female (F), and total (T) subjects for each stimulus.

Duration(s)		0.03	0.05	0.07	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20	30	50	90	Triang.
60 dB																
M	Mean	-0.964	-0.951	-0.911	-0.777	-0.832	-0.650	-0.691	-0.583	-0.486	-0.421	-0.314	-0.274	-0.203	-0.112	-0.595
	C. L.	0.105	0.138	0.120	0.094	0.127	0.110	0.131	0.130	0.107	0.101	0.110	0.132	0.122	0.208	0.176
F	Mean	-0.788	-0.845	-0.796	-0.771	-0.754	-0.619	-0.585	-0.540	-0.479	-0.436	-0.379	-0.330	-0.290	-0.195	-0.570
	C. L.	0.082	0.116	0.114	0.146	0.109	0.060	0.133	0.127	0.095	0.129	0.141	0.157	0.203	0.210	0.179
T	Mean	-0.876	-0.898	-0.854	-0.774	-0.793	-0.634	-0.638	-0.561	-0.482	-0.428	-0.361	-0.302	-0.246	-0.154	-0.582
	C. L.	0.073	0.083	0.078	0.076	0.076	0.055	0.086	0.080	0.063	0.073	0.079	0.091	0.106	0.131	0.110
70 dB																
M	Mean	-0.819	-0.692	-0.723	-0.664	-0.602	-0.469	-0.452	-0.432	-0.267	-0.189	-0.169	-0.093	-0.027	0.076	-0.406
	C. L.	0.096	0.118	0.122	0.118	0.118	0.082	0.090	0.097	0.078	0.081	0.064	0.121	0.126	0.136	0.141
F	Mean	-0.747	-0.665	-0.659	-0.595	-0.540	-0.512	-0.398	-0.329	-0.256	-0.235	-0.141	-0.130	-0.073	-0.030	-0.355
	C. L.	0.121	0.129	0.117	0.121	0.114	0.045	0.100	0.101	0.067	0.077	0.089	0.112	0.143	0.179	0.181
T	Mean	-0.783	-0.678	-0.691	-0.630	-0.571	-0.491	-0.425	-0.381	-0.261	-0.212	-0.155	-0.111	-0.050	0.023	-0.380
	C. L.	0.070	0.077	0.076	0.076	0.074	0.042	0.060	0.066	0.045	0.050	0.048	0.073	0.084	0.102	0.101
80 dB																
M	Mean	-0.540	-0.531	-0.499	-0.531	-0.344	-0.264	-0.265	-0.233	-0.092	0.0	0.070	0.084	0.181	0.290	-0.146
	C. L.	0.091	0.098	0.128	0.096	0.078	0.056	0.071	0.064	0.056	0.0	0.029	0.060	0.097	0.105	0.103
F	Mean	-0.550	-0.524	-0.522	-0.403	-0.393	-0.254	-0.221	-0.166	-0.068	0.0	0.038	0.118	0.161	0.207	-0.067
	C. L.	0.153	0.145	0.115	0.098	0.100	0.076	0.061	0.078	0.058	0.0	0.061	0.100	0.117	0.138	0.122
T	Mean	-0.545	-0.527	-0.510	-0.467	-0.369	-0.259	-0.243	-0.200	-0.080	0.0	0.054	0.101	0.171	0.248	-0.107
	C. L.	0.078	0.077	0.076	0.068	0.057	0.042	0.042	0.047	0.036	0.0	0.031	0.052	0.067	0.079	0.073
90 dB																
M	Mean	-0.390	-0.345	-0.298	-0.288	-0.185	-0.043	-0.040	0.026	0.148	0.232	0.310	0.376	0.444	0.519	0.079
	C. L.	0.108	0.090	0.074	0.079	0.069	0.052	0.055	0.043	0.066	0.056	0.098	0.101	0.133	0.133	0.077
F	Mean	-0.463	-0.382	-0.336	-0.240	-0.182	-0.055	0.055	0.010	0.183	0.263	0.340	0.388	0.434	0.522	0.118
	C. L.	0.184	0.143	0.129	0.099	0.083	0.054	0.058	0.055	0.036	0.086	0.054	0.098	0.112	0.163	0.089
T	Mean	-0.426	-0.363	-0.317	-0.264	-0.183	-0.049	0.007	0.068	0.166	0.248	0.325	0.382	0.439	0.520	0.099
	C. L.	0.095	0.075	0.066	0.057	0.047	0.033	0.042	0.037	0.034	0.045	0.049	0.062	0.076	0.092	0.052

第5章 騒音のうるささに及ぼす レベルの変動特性の効果

第5章 騒音のうるささに及ぼす レベルの変動特性の効果

1. はじめに

騒音レベルの評価尺度として提案されている $TNI^{1)}$ (Traffic Noise Index) はレベルの変動幅を含んでおり、これから導出された $NPL^{2)}$ (Noise Pollution Level) は変動幅をレベル変動の標準偏差で扱っている。この他、レベルの時間的変化率(レベルの変動速度)³⁾やレベルの変動周波数⁴⁾を考慮すべきであるといった提案も行われている。これらの評価尺度はいずれも人間の反応に基づいて決定される係数を含んでいて、中にはその妥当性の検証されていないもの³⁾もあるが、多くはアンケート調査の結果から妥当性を検討し、未知係数も決められてきた。しかし、一般的に言って、野外調査では各個人の反応に対応する物理条件の時点の把握の不精確さ、社会的条件による反応の偏り、レスポンスの再現性等の面で、未知係数の決定にあたって精度の高い成績を得ることは必ずしも容易でない。

騒音の物理特性の変化とそれに対応する人間の反応の変化との関係を知るためには、室内実験を行なうことが必要であるが、現在までにレベルが時間的に変動する音(変動音)のラウドネスあるいはうるささに関する実験が行なわれた例は少ない。その最大の理由は、変動音の作製が困難なことである。最近になって二、三の実験例^{5)~8)}が報告されているが、いずれも、音圧の振幅を確率的に変化させる装置⁵⁾やプログラムによって音のレベルを制御する装置⁹⁾を開発したり、刺激音の発生を含めて実験そのものを電子計算機によって自動化⁸⁾した結果初めて実験が可能となっている。しかし、これらの実験に用いられた刺激音は継続時間が比較的短く、変動特性の把握が不十分であったため、各種騒音評価尺度の妥当性を検討できる資料は得られていない。

この点を考慮して筆者は、変動騒音の変動特性として、レベル変動の標準偏差、レベルの時間的変化率

(レベルの変動速度)及びレベル変動の周波数の三つの変動特性に着目し、これらとうるささとの関連を検討する実験を行なった。レベル変動の標準偏差に着目した理由は、 NPL でこれが用いられていること、 TNI も変動幅を考慮していること、常識的にこれが最もうるささに寄与する変動要因であると予想されることである。また、レベルの変動速度及び周波数に着目した理由は、変動の緩急によってうるさが異なると考えられること、及び現在騒音の測定法として広く行なわれているいわゆる5秒間隔50回法の妥当性を検討する一方法となり得ることである。

2. 鋸歯状変動騒音による実験 I

2.1 実験方法

2.1.1 刺激音

刺激音には、Fig. 1 に示すようなレベル変動を呈する鋸歯状変動騒音を用いた。鋸歯状変動騒音では、 $|dL/dt|$ は折れ曲り点を除いて on time 中一定に保たれ、レベルの分布は一様分布である。

正弦波ランダム信号発生装置(B & K, 1024)で発生させたホワイトノイズをユニバーサルフィルター(JEIC, UF-4)に通し、90 Hz 以下および 12,500 Hz 以上で切断した信号を騒音レベル制御装置(森技研, SG-112)に入力してレベルを制御した。刺激音のレベルの測定と監視は人工耳(B & K, 4153)と精密騒音計(B & K, 2203)とで行なった。

刺激音の $1/3$ オクターブバンド分析の結果を Fig. 2 に示

Table 1 Some physical characteristics of stimulus sounds used in Experiment I.

\bar{L} (dBA)	70
dL/dt (dB/s)	20, 40, 80, 200
ΔL (dB)	6, 10, 20, 30, 40
Duration (s)	12

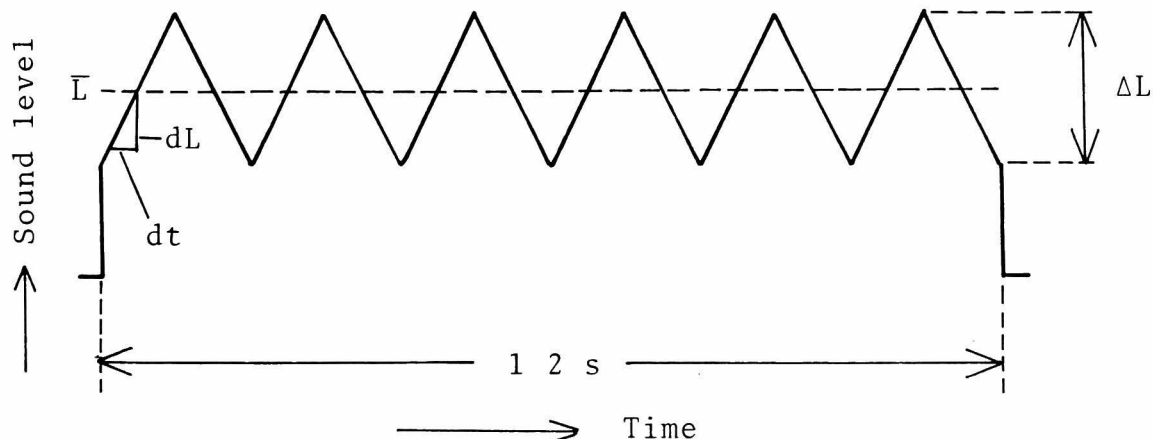


Fig. 1 An idealized time patter of stimulus sounds
used in the experiment. (Serrately fluctuating noise)

す（オーバーオール音圧レベルは 90 dBC）。図中の 2 本の直線は 3 dB/oct. の傾斜を有し、たがいに 2 dB 離れた直線である。

刺激音の物理特性を Table 1 に示した。刺激音の継続時間は 12s である。レベルの算術平均 (\bar{L}) は 70 dBA (ホワイトノイズであるから dBA \approx dBC) である。以下同様) に保ち、レベルの変動速度 (dL/dt) は 20, 40, 80, 200 dB/s, レベルの変動幅 (ΔL) は 6, 10, 20, 30, 40 dB とした。これらの 20 個の鋸歯状変動騒音に加えて、継続時間が 12s の定常音を 5 個 (レベルは 55, 62, 70, 78, 85 dBA) 加えて、合計 25 個の騒音を用いて実験を行なった。

鋸歯状変動騒音の場合、 L_{eq} , σ , NPL , TNI は、それぞれ \bar{L} および ΔL を用いて、つぎのように表わされる。

$$L_{eq} = \bar{L} - \frac{\Delta L}{2} + 10 \log_{10} \frac{10}{\log_e 10} - 10 \log_{10} \Delta L + 10 \log_{10} \left(\text{antilog} \frac{\Delta L}{10} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\sigma = \left[\frac{1}{T} \int_0^T (L(t) - \bar{L})^2 dt \right]^{1/2} = \frac{\Delta L}{2\sqrt{3}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} NPL &= L_{eq} + 2.56 \sigma = L_{eq} + 0.739 \Delta L \\ &= \bar{L} + 0.239 \Delta L + 10 \log_{10} \frac{10}{\log_e 10} - 10 \log_{10} \Delta L \\ &\quad + 10 \log_{10} \left(\text{antilog} \frac{\Delta L}{10} - 1 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$TNI = \bar{L} + 2.80 \Delta L - 30 \quad (4)$$

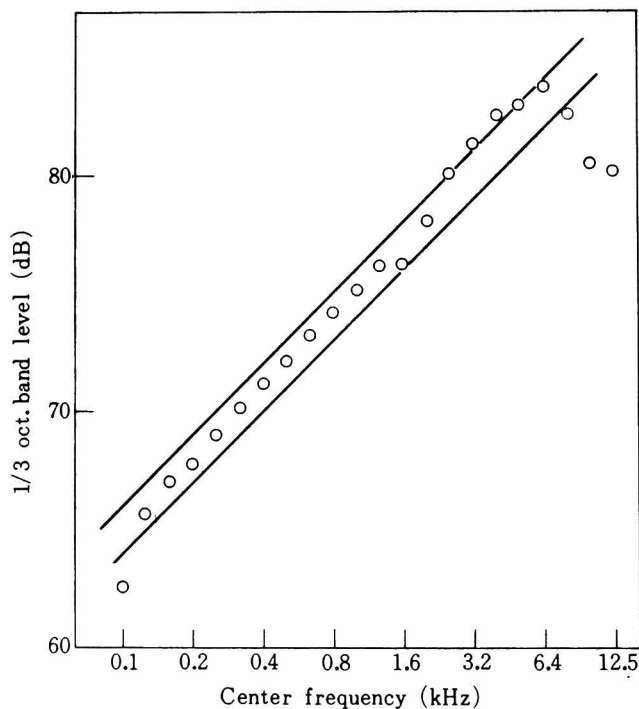


Fig. 2 1/3 octave band analysis of stimulus sounds.

Lines show the spectrum slope of 3 dB/oct. and are at a distance of 2 dB from each other. Over all sound pressure level is 90 dBC.

2.1.2 実験手法

上記 25 個の刺激音をランダムに配置して、テープレコーダー (NAGRA, IV-SJ) で録音し、これを実験時に再生して防音室内の被検者の両耳にヘッドホン (STAX, SR-X) で呈示した。刺激音の配置の仕方は 5 種類とし、その逆の配置をも加えて、5 対の刺激系列対を作製した。各被検者は、このうち 2 系列対の音を呈示されたので、各刺激音を 4 回判定している。片寄りを避けるため、各被検者に呈する 2 系列対の選択は任意とし、かつ各系列対は男女 4 名ずつの被検者に呈示されるようにした。実験時間は、1 人の被検者について、40~60 分要したが、連続して 10 分以上実験することはなかった。

うるささの判定はマグニチュード評価法によった。すなわち、各被検者には、上記のようにしてランダムに配置された刺激音がつぎつぎと呈示され、被検者はそれぞれの音のうるささを評価して点数をつける。点数のつけ方は任意としたが、点数は比の値のみが意味をもつことを被検者によく説明した。また、うるささとはたんに音の大小のみでなく、不快であるとか、びっくりしたとかいった感じも含めた総合的な印象であると教示した。なお、刺激音時間間隔 (off time) は 10s である。

2.1.3 被検者

健康な青年男女各 10 名、合計 20 名を被検者とした。被検者の選定にあたっては、0.5, 1, 2, 4, 8 kHz のオーディオメトリーを両耳について行ない、いずれの測定周波数においても閾値が JIS の Hearing Level で 15 dB 以下の者を採用した。

各被検者は本実験に入る前に、比の感覚の把握および評点の仕方の練習のために、まず 10 数種の長さの線分を用いて 10~20 回程度マグニチュード評価法の練習を行ない、さらに 50~90 dBA の騒音を用いて同様の練習を行なった。

2.2 実験結果と考察

55 dBA の定常音のうるささを 1 とし、その他の刺激音のうるささの比を各被検者ごとに算出し、うるささの比の幾何平均を実験成績とした。

Fig. 3 は横軸に定常音のレベルをとり、縦軸にうるささの比を対数尺度上にとって成績をプロットした図である。これより、定常音のレベルとうるささの比の対数とは線型関係にあることがわかる。図中の直線は最小自乗法で求めた回帰直線である。この直線の式は、うるささの比を ψ 、定常音のレベルを L とすれば、

$$\log \psi = 0.0317 L - 1.751 \quad (5)$$

であり、相関係数は 0.9997 であった。この関係から、逆に鋸歯状変動騒音のうるささの比 ψ が得られた場合の L を求めることができる。この L はうるささが鋸歯状変動騒音のそれと等価な定常音のレベルとみなされるので、以下これを ESL (Effective Sound Level; 実効騒音レベル)

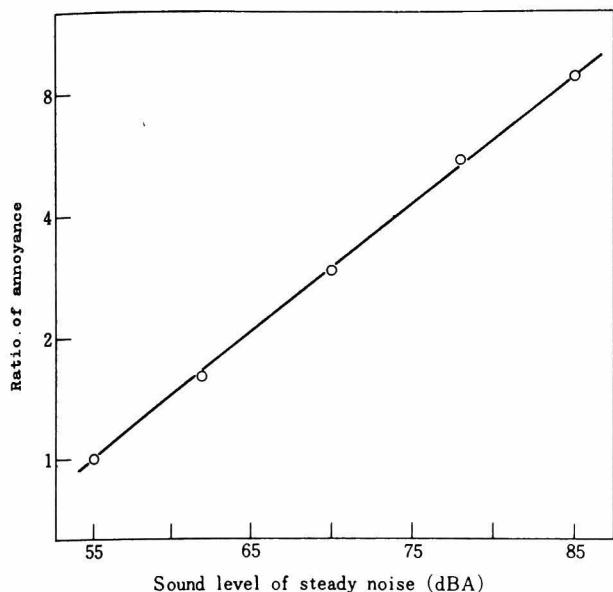


Fig. 3 Relation between ratio of annoyance and sound level of steady noise (Experiment I). Effective Sound Levels ($ESLs$) of other stimulus sounds are calculated from this relation.

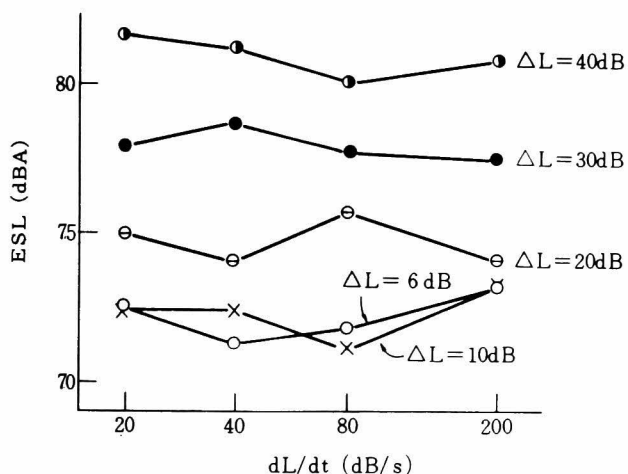


Fig. 4 ESL vs. dL/dt .

ESL does not significantly change with dL/dt when ΔL and \bar{L} (70 dBA, following are similar) are constant.

ル)と呼称する。 ESL の値は章末のAppendix A に示す。

Fig. 4 では ESL をレベルの変動速度 $|dL/dt|$ に対してプロットした。図からわかるように、 $|dL/dt|$ の増加に伴ってうるささが増加しているとは認められない。この成績からみれば、Muller の L'_{eq} を変動騒音のうるささの評価に適用することは適当ではないと考えられるが、さらに $|dL/dt|$ の値の小さい場合については検討を要する。

つぎに ESL をレベルの変動幅 (ΔL) に対してプロットしたのが Fig. 5 である。ここでは ΔL とともにうるささが増大している。また、Fig. 6, 7 では ESL の値を dL/dt

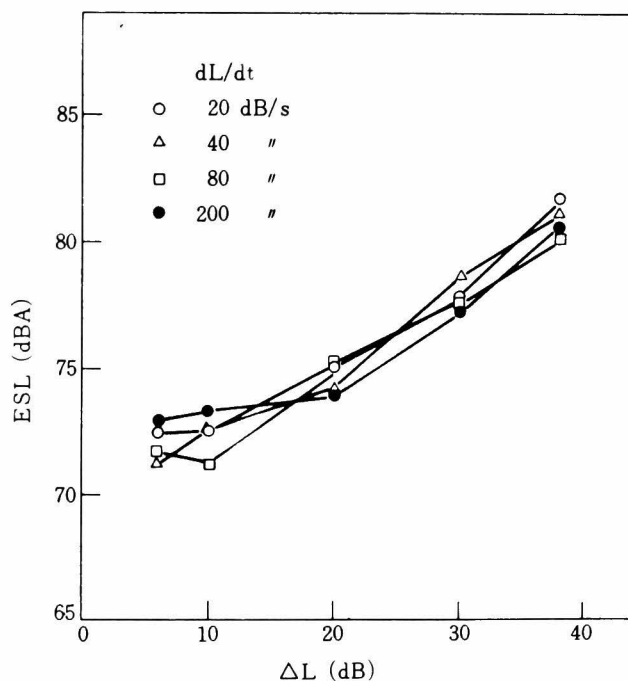


Fig. 5 ESL vs. ΔL (Experiment I).

ESL increases with ΔL when \bar{L} is constant.

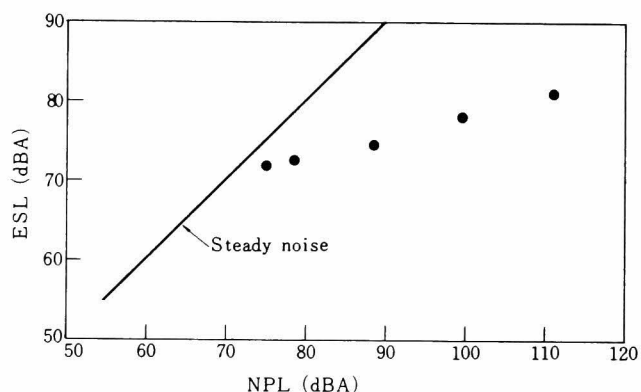


Fig. 6 ESL vs. NPL (Experiment I).

$ESLs$ are averaged on fluctuation speed. Solid line shows the result of steady noise. ESL increases with NPL when \bar{L} is constant, but the rate of increase is much less than that for steady noise.

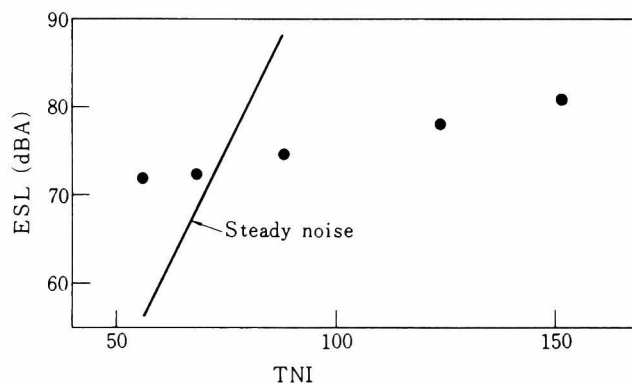


Fig. 7 ESL vs. TNI (Experiment I).

$ESLs$ are averaged on fluctuation speed. Solid line shows the result of steady noise. ESL increases with TNI when L is constant.

に関して平均し NPL , TNI に対してプロットした。図中に引いた直線は定常音の成績を示している。Fig. 6 および 7 においては NPL および TNI の増加とともに ESL も増加している。これらの図よりすれば、 NPL , TNI は騒音のうるささと一見よい対応を示すとみられる。

しかし、定常音 ($\sigma = 0$) の場合は、 NPL は定常音のレベルそのものであり、かつ特定の変動音の NPL の数値に等しいレベルを有する定常音と当該変動音とはうるさが等しくなければならない。したがって、 NPL が騒音の評価尺度として適切なら、 NPL に対する ESL の回帰直線は定常音の成績を示す直線にほぼ一致し、その回帰係数は 1 またはそれに近い値になる必要があるが、実際は 0.255 であった。これからは、 NPL はうるささとの対応がよくなく、騒音の評価尺度として必ずしも適切でないと考えられる。また、 TNI についても同様である。これらの評価尺度の妥当性については、さらに検討する余地がある。

今回の実験では \bar{L} を一定として ΔL を変えているため、 ΔL の変化とともに L_{eq} が変わり、これが NPL を増大させていることが考えられる。いま、 ESL を L_{eq} に対してプロットすれば Fig. 8 を得る。図中に実線で示した直線は定常音の成績を示しており、点線で示した直線は回帰直線を示している。この回帰直線の回帰係数は 0.910 と 1 に近い値になっており、しかも上記両直線はたがいに接近している。したがって、 NPL に比べて L_{eq} の方がよりよく ESL に対応しているといえる。

以上のことより、変動幅がうるささに及ぼす効果をみるためには、 L_{eq} を一定にして変動幅を変えた刺激音を用いて実験する必要があることがわかる。

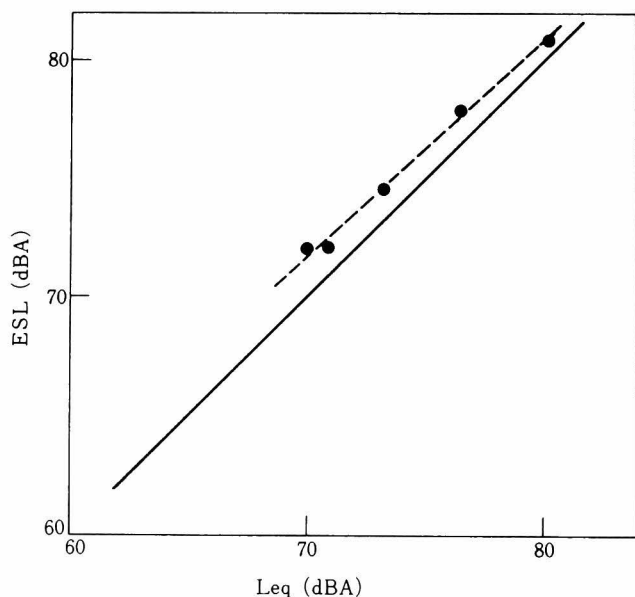


Fig. 8 ESL vs. L_{eq} (Experiment I).
 ESL s are averaged on fluctuation speed. Solid line shows the result of steady noise.

3. 鋸歯状変動騒音による実験 II

3.1 実験方法

3.1.1 刺激音

刺激音の物理特性を Table 2 に示す。ここでは、 $|dL/dt|$ は 80 dB/s として一定に保ち、 ΔL を 6, 10, 20, 30, 40 dB と変えて、 L_{eq} を 70, 75, 80, 85 dBA と変えた。刺激音の継続時間は 12s である。

その他の刺激音に関する実験条件は 2.1 に記載したとおりである。

3.1.2 実験手法

2.1.2 と同様である。

3.1.3 被検者

2.1.3 と同じ被検者を用いた。

3.2 実験結果と考察

2.2 で述べたようにして、各刺激音の ESL を算出し、実験成績とした (Appendix B 参照)。

Fig. 9 では ESL を ΔL に対してプロットした。Fig. 5 の場合とは異なり、同じ L_{eq} に対しては ΔL の増加に伴う ESL の増加は著明ではない。したがって、 ESL は $NPL = L_{eq} + 2.56\sigma$ に対しては比例しないと予想される。事実、Fig. 10 に示すように、 L_{eq} を一定にして ΔL を増大させることによって NPL を増しても、 ESL は増加しなかった。また、Fig. 11 でも同様に、 ΔL 増加による TNI の増加によってうるさが増加しなかった。したがって、この場合にも NPL および TNI がうるさを適切に評価しているとは認めがたい。

Fig. 10 の成績から、 L_{eq} が ESL によく対応するので

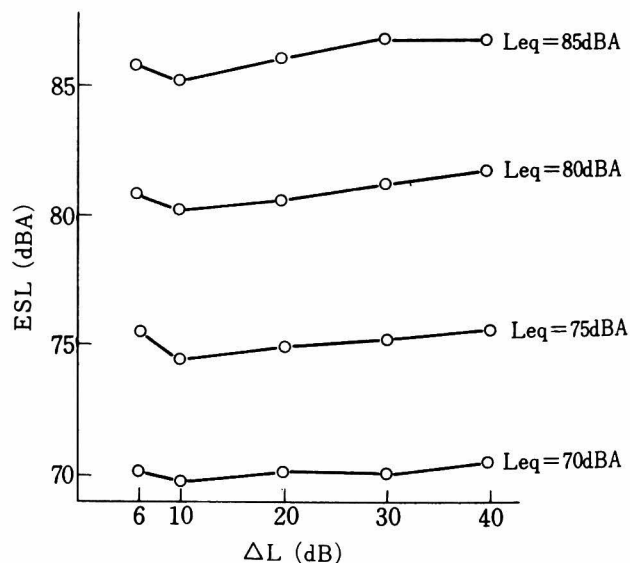


Fig. 9 ESL vs. ΔL .

ESL does not show a significant increase with ΔL when L_{eq} is constant.

Table 2 Some physical characteristics of stimulus sounds used in Experiment II.

dL/dt (dB/s)	80
ΔL (dB)	6, 10, 20, 30, 40
L_{eq} (dBA)	70, 75, 80, 85
Duration (s)	12

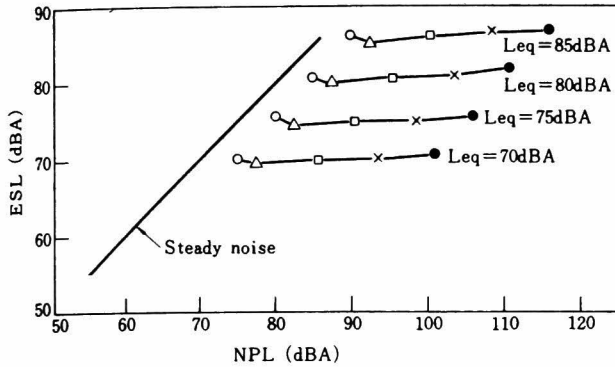


Fig. 10 ESL vs. NPL (Experiment II).

○; $\Delta L=6$ dB, Δ ; $\Delta L=10$ dB, □; $\Delta L=20$ dB,
×; $\Delta L=30$ dB, ●; $\Delta L=40$ dB

Solid line shows the result of steady noise. ESL is not proportional to NPL in this case.

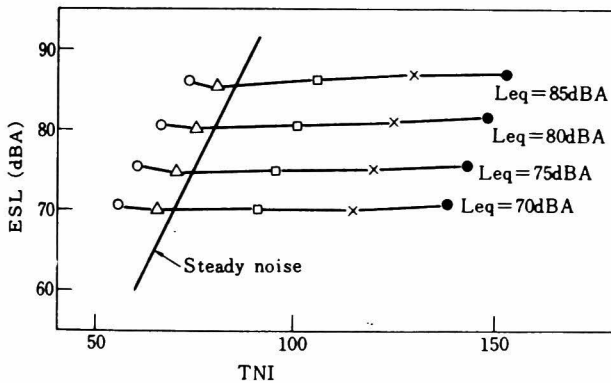


Fig. 11 ESL vs. NPL (Experiment II).

○; $\Delta L=6$ dB, Δ ; $\Delta L=10$ dB, □; $\Delta L=20$ dB,
×; $\Delta L=30$ dB, ●; $\Delta L=40$ dB

ESL is not proportional to TNI in this case.

はないかと考えられるので、実験 I の成績をも含めて、 L_{eq} に対して ESL をプロットしたのが Fig. 12 である。図中の直線は、 $ESL = L_{eq}$ の関係を示している。 ESL は比較的よく L_{eq} に比例して増加している。しかし、ほとんどの成績は直線の上側に分布しており、変動騒音の L_{eq} よりやや高いレベルの定常音と変動騒音が等価であることを示している。この傾向は難波ら⁷⁾が報告した成績と一致する。

NPL , TNI , L_{eq} はアンケート調査との対応がよいとして提案されており、この場合、回答者は長期間の騒音暴露に対して反応している。この点、室内実験では刺激音の継続時間は短く、このような実験成績のみでこれらの評価尺度の妥当性を否定することはできないが、この実験で用いた刺激音では上述の結果となった。さらに刺激音等の実験条件を変えて検討する必要がある。

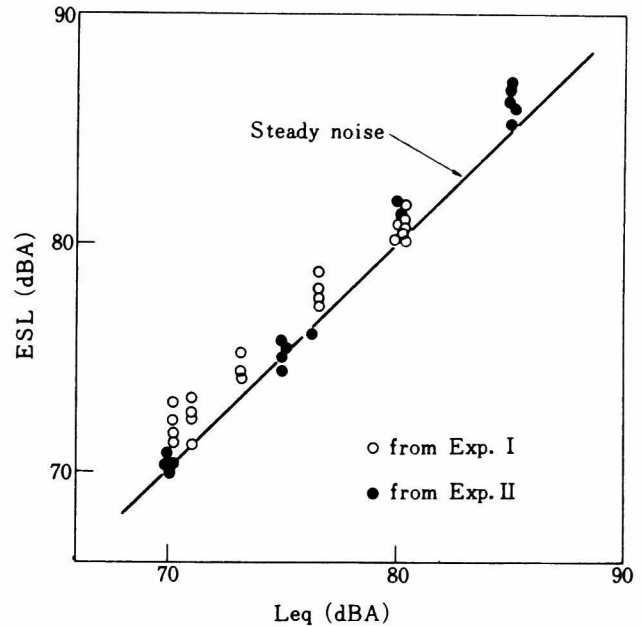


Fig. 12 ESL vs. L_{eq} (Experiment I and II).

ESL is nearly proportional to L_{eq} .

4. 1 次の自己回帰型ランダム変動騒音

自動車が自由走行している状態の交通騒音のレベルのコレログラムは指数型であり、レベルの分布は正規分布に近い¹⁰⁾。この騒音を模擬して、レベル変動が 1 次の自己回帰過程となり、レベルが正規分布する騒音を作製した。この種の騒音を 1 次の自己回帰型ランダム変動騒音と呼称する。ここでは、レベルの変動特性のうち、レベルの標準偏差 σ とうるささとの関連を検討する。

4.1 実験方法

4.1.1 刺激音

X_t を無相関の確率変数、 α_1 を定数とすると、

$$Y_t = \alpha_1 Y_{t-1} + X_t \quad (t = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots) \quad (6)$$

で得られる Y_t の平均値 \bar{Y}_t と分散 σ_Y^2 は次式で表わされる¹¹⁾

$$\bar{Y}_t = \bar{X}_t / (1 - \alpha_1) \quad (7)$$

$$\sigma_Y^2 = \sigma_X^2 / (1 - \alpha_1^2) \quad (8)$$

ここに \bar{X}_t は X_t の平均値、 σ_X^2 はその分散である。

また、 Y_t のコレログラム (ρ_k) は、

$$\rho_k = \alpha_1^k \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

で表わされる。今、100ms 毎にレベルを変動させるとし、遅れ時間 τ が 1s のとき自己相関係数が 0.5 となるように α_1 を定めれば、 $\alpha_1=0.933$ となる。この時、自己相関関数 $R(\tau)$ は、 $\tau=0.1k(s)$ であるから、

$$R(\tau)=\exp(-0.693\tau) \tag{10}$$

となる。 α_1 の値が小さすぎるとレベルの変動が激しすぎて騒音が衝撃的となり、大きすぎると 50s の継続時間内ではレベル変動に傾向があらわれるので、これを避けるためにこの値に定めた。現実の騒音との対応という観点からは継続時間は長い程よいが、測定精度を考慮して、50s とした。

刺激音の作製に際しては、 σ と \bar{L} (レベルの算術平均) 又は σ と L_{eq} によって刺激音を定め、このおのこの条件について 3 個ずつの刺激音を作製した。今回は **Table 3** に記載したように、 σ は約 5, 10, 15dB と、 \bar{L} は 70 \pm 0.5 dBA と、又 L_{eq} は 3 個の刺激音の平均が 87.5 \pm 0.5 dBA となるようにした。 \bar{L} が 70 \pm 0.5 dBA で σ が約 15 dB の刺激音はその L_{eq} の平均が 87.7 dB となった。したがって結局ランダム変動騒音は 15 個作製した。これに 4 個の定常騒音(レベルは 65, 75, 85, 95 dBA)を加えて合計19個の刺激音を用いた。

Fig.13は刺激音のレベル変動をレベルレコーダーで記録した図である。

Table 3 Some physical characteristics of stimulus sounds and their Effective Sound Levels.
(Randomly fluctuating noise of Markoff series type)

Duration : 50 s
Steady noise :
Sound level (dBA) ; 65, 75, 85, 95
Fluctuating noise :

σ (dB)	\bar{L} (dBA)	L_{eq} (dBA)	ESL(dBA)
5.1	70.4	73.8	75.5
5.1	69.7	72.7	73.9
4.9	70.4	72.9	72.9
5.1	85.4	88.8	95.0
5.1	84.7	87.7	92.7
4.9	84.4	86.9	91.0
9.6	69.6	79.0	80.8
10.2	69.9	81.0	83.2
10.8	70.0	79.1	79.2
9.6	77.6	87.0	89.4
10.2	75.9	87.0	89.3
10.8	78.0	87.1	90.2
14.4	70.2	87.6	88.5
14.9	70.1	88.4	88.7
15.8	70.5	87.0	89.9

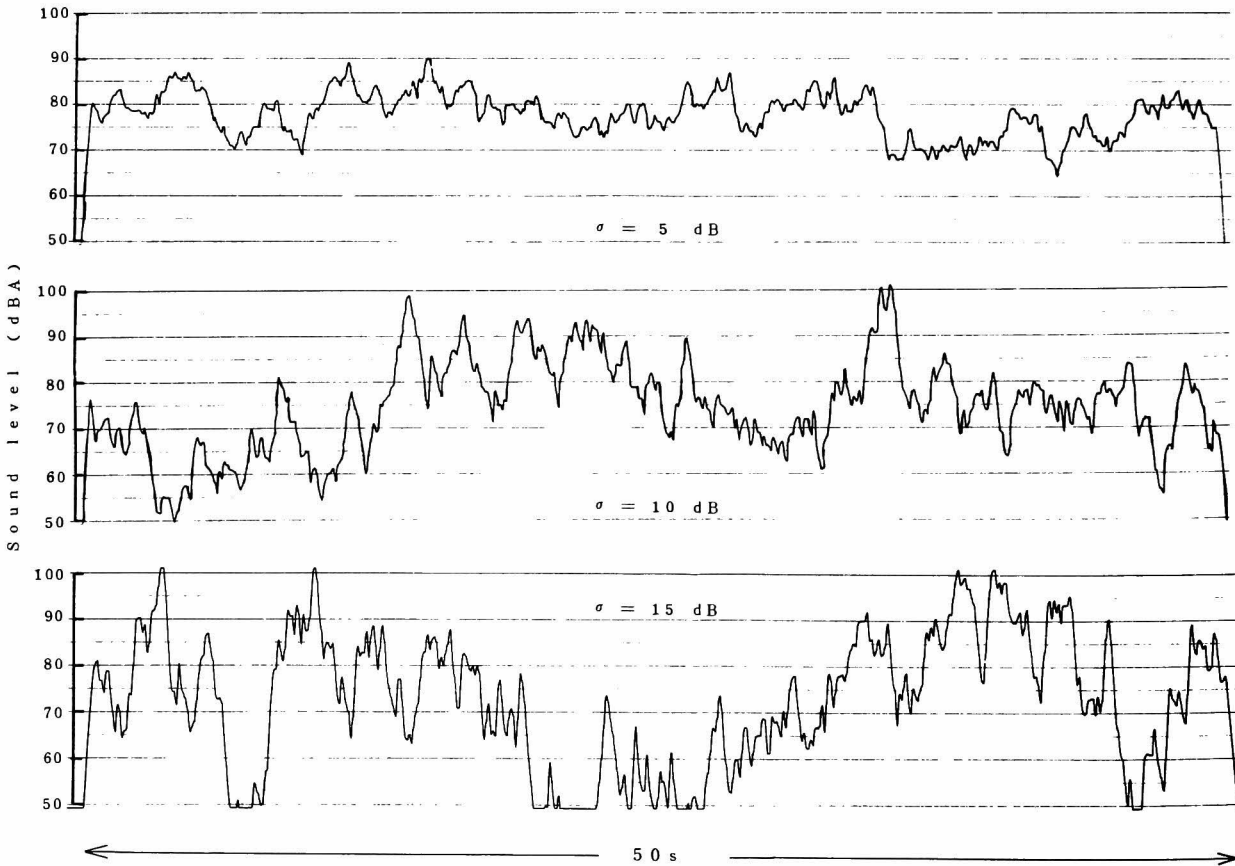


Fig.13 Examples of level fluctuation of randomly fluctuating noises of Markoff series type. Writing speed is 100dB/s.

4.1.2 刺激音の作製

σ_Y が Table 3 に示した σ の値をとるように式(8)から逆算した σ_X を有する正規乱数 X_i を電子計算機で発生させ、式(6)によって Y_i を計算した。 $\Delta t=0.1s$ で継続時間が 50s であるから、1 個の変動騒音につき Y_i の値は 500 個定められており、このような 500 個の乱数を 15 種選んだ。500 個の乱数による実現値では、 σ_Y 、コレログラム等の値は所与の値に必ずしもならないので、 σ_Y が所与の値から $\pm 10\%$ 以内に実現したものを刺激音として用いた。前項で、刺激音の \bar{L} , L_{eq} , σ の値を「約」と記し、記号 (\approx) を用いたのはこのためである。

なお、 X_i が正規分布すれば Y_i も正規分布する¹¹⁾。

このようにして得た Y_i を騒音レベル制御装置（森技研, SG-112）にプログラムとして入力した。

刺激音はホワイトノイズである。正弦波ランダム信号発生装置（B&K, 1024）で発生させたホワイトノイズをユニバーサルフィルター（JEIC, UF-4）に通し、90 Hz 以下及び 12500 Hz 以上を切断した信号を騒音レベル制御装置に入力し、そのレベルを所定のプログラムに従って制御した。刺激音のレベルの測定と監視は人工耳（B&K, 4153）、精密騒音計（B&K, 2203）及びレベルレコーダー（B&K, 2305）を用いて行なった。

刺激音の 1/3 オクターブバンドレベルは中心周波数 100 ないし 8000 Hz の範囲で 3 dB/oct の傾きを有する直線から ± 1.5 dB 以内にあった。

4.1.3 実験手法

上記 19 個の刺激音をランダムに配置して 1 つの刺激系列をつくり、テープレコーダー（NAGRA, IV-SJ）で録音した。各刺激音（19 個）間の時間間隔（off-time）は 10 s とした。このような刺激系列を 5 個つくり、そのうちの 2 系列を被検者に呈示した。したがって各刺激は 1 人の被検者に対して異なる刺激系列内で 2 回ずつ呈示されている。

刺激音はテープレコーダーで再生して、防音室内の被検者の両耳にヘッドホン（STAX, SR-X）で呈示した。

うるささの測定はマグニチュード評価法（method of magnitude estimation）によった。点数の用い方は被検者の任意とし、いわゆる modulus は用いていない。ただし、数値は相対的な比の値が意味を有することを説明した。音のうるささの判定においては単に音が大きいとか小さいかだけでなく、耳障りであるとか、不快であるとか、びっくりしたとかいった感じをも含めて全体的な印象に基づいて評価するよう教示した。

4.1.4 被検者

聴力正常な青年（19 歳～29 歳）男女各 15 名ずつ計 30 名を被検者に採用した。

各被検者は本実験に入る前に、比の感覚の把握及び評点の仕方の練習のために、十数種の長さの線分及び 60 ないし 90 dBA の範囲の騒音を用いて magnitude estima-

tion 及び magnitude production の練習を十分行なった。

また、30 名の被検者の中には、1 回目と 2 回目の成績の相関の良くない者がある。本実験では、1 回目と 2 回目の相関係数が 0.6 以下の者は除外し（母相関係数 = 0 を危険率 1% で棄却）、別の被検者を新たに採用した。全被検者を通じた 2 回の成績の相関係数は 0.841 である。

4.2 実験結果

各被検者は刺激音に対して任意に点数をつけており、点数は刺激間の相対的な比のみが意味を有するので、次のようにしてデータを整理した。まず、各被検者が評点した数値を対数変換して、全被検者の全刺激音に対する平均値を求める。次に各被検者のすべての評点の平均値

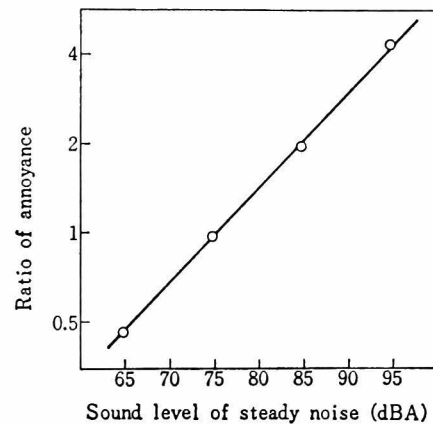


Fig. 14 Relation between ratio of annoyance and sound level¹⁾ of steady noise. Effective Sound Levels (ESLs) of randomly fluctuating noises of Markoff series type are calculated from this relation.

が上記の平均に一致するようおのおのの評点を補正する。こうすれば、各被検者の評点は相対的な比の対数として、互に比較し得るデータとなる。実際には 75 dBA の定常音に対して得られた平均値が 0 すなわちうるささの比が 1 となるように全データを再補正して実験成績とした。

定常音の成績を Fig. 14 に示した。図からわかるようにうるささの比の対数は定常音のレベルに対して線型関係にある。図中の直線は最小自乗法で求めた回帰直線であり、これはうるささの比を ϕ とすれば次式で表わされる。

$$\log \phi = 0.0318 L_s - 2.391 \quad (11)$$

ここに L_s は定常音のレベルである。相関係数は 0.9997 であった。この回帰係数の値から ϕ に対する音の強さのべき指数は 0.318 であると知られる。ランダム変動騒音の成績は ϕ で得られるので、これを式(11)によって L_s に換算すれば、この L_s はランダム変動騒音とうるささが等価な定常音のレベルとみなすことができる。以下、このレベルを ESL (Effective Sound Level; 実効騒音レベル) と呼称する。Table 3 に各刺激音の ESL を併記した。

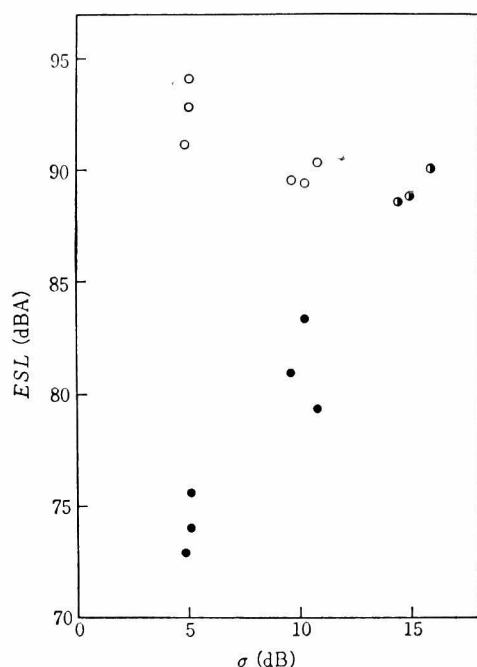


Fig. 15 *ESL vs. standard deviation of level fluctuation (σ).* (Randomly fluctuating noise of Markoff series type) ○; $L_{eq} \approx 87.5$ dBA, ●; $\bar{L} \approx 70$ dBA, ◐; $\bar{L} \approx 70$ dBA and $L_{eq} \approx 87.5$ dBA.

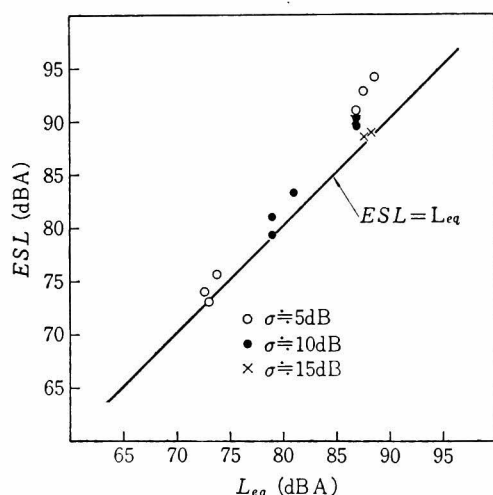


Fig. 16 *ESL vs. L_{eq}*
(Randomly fluctuating noise of Markoff series type)

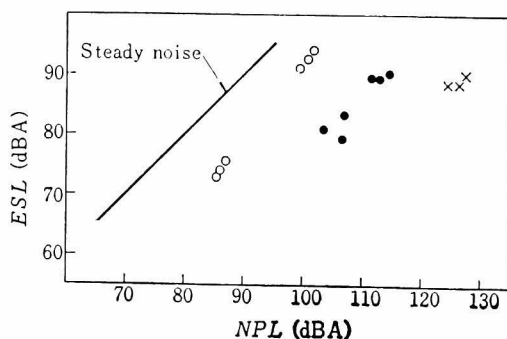


Fig. 17 *ESL vs. NPL (Noise Pollution Level)*
(Randomly fluctuating noise of Markoff series type)
The line shows the result of steady noise.
○; $\sigma \approx 5$ dB, ●; $\sigma \approx 10$ dB, ×; $\sigma \approx 15$ dB

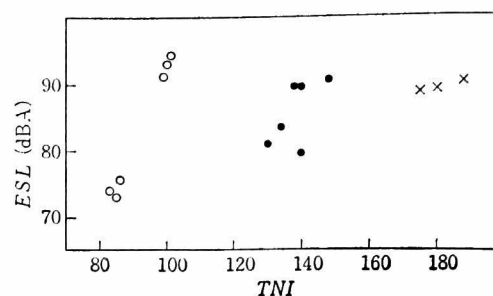


Fig. 18 *ESL vs. TNI (Traffic Noise Index)*
(Randomly fluctuating noise of Markoff series type)
○; $\sigma \approx 5$ dB, ●; $\sigma \approx 10$ dB, ×; $\sigma \approx 15$ dB

レベル変動の標準偏差(σ)がうるささに及ぼす効果をみるため、横軸に σ をとって *ESL* をプロットした図が **Fig. 15**である。*ESL* は、 \bar{L} が一定の時は σ の増加とともに増大しているが、 L_{eq} が一定の時にはむしろ σ の増加に従って僅かに減少している。

\bar{L} を一定にして σ を増加させると L_{eq} も増加するので、 \bar{L} が一定の時 *ESL* が σ とともに増加するという成績は、 L_{eq} の増大に起因するとも考えられる。**Fig. 16**では L_{eq} を横軸にとって *ESL* をプロットした。図中の直線は $ESL = L_{eq}$ の関係を示しており、うるさが L_{eq} によって規定されるなら、各成績はこの線上に乗るはずである。**Fig. 16**では実験成績は直線よりやや上側に位置しているが、全体的に L_{eq} の増大に伴って *ESL* が増大している。

以上の結果から、*ESL* は $NPL (= L_{eq} + 2.56\sigma)$ に比例しないと予想される。事実、*NPL* に対して *ESL* をプロットすれば (**Fig. 17**)、実験成績はばらつき、かつ直線で示した定常音の成績からも大きくはずれる。また、*TNI* についても同様である (**Fig. 18**)。

5. 正弦波状変動騒音

騒音レベルの変動周波数とうるささとの関係を検討するために用いる刺激音としては、第1にレベルが正弦波状に変動する騒音(正弦波状変動騒音)が考えられるので、これを用いて実験を行なった。この騒音は航空機や自動車が等間隔で通過する場合の模擬音とも考えられる。

5.1 実験方法

5.1.1 刺激音

Fig. 19に示すようなレベル変動を呈する正弦波状変動騒音を刺激音とした。正弦波状変動騒音ではレベル変動の周波数を f (Hz) とすると、時刻 t (s) における騒音のレベルは

$$L = -\sqrt{2}\sigma \cos 2\pi ft + \bar{L} \quad (12)$$

で表わされる。ここに、 σ はレベルの標準偏差、 \bar{L} はレベルの算術平均である。この場合、 L_{eq} 及び L_{α} は次式で表わされる。

$$L_{eq}=10 \log \left[I_0 \left(\frac{1_n 10}{10} \sqrt{2} \sigma \right) \right] + \bar{L} \quad (13)$$

$$L_{100-\alpha} = \sqrt{2} \sigma \sin \left(\frac{\alpha}{100} - \frac{1}{2} \right) \pi \quad (14)$$

ここに、 I_0 は 0 次の変形ベッセル関数である。

Table 4 に実験に用いた刺激音の物理特性を示した。刺激音は $\bar{L}=70\text{dBA}$ として、 σ の 3.54, 10.61, 17.68dB の各々について、 f を 0.1, 0.3, 1.0Hz と変えた。また $L_{eq}=87.5\text{dBA}$ として同様にした。ただし、 $\bar{L}=70\text{dBA}$ で $\sigma=17.68\text{dB}$ の音は、 $L_{eq}=87.3\text{dBA}$ となるので、実験に用いた正弦波状変動騒音の個数は15である。これに定常音を4個（レベルは 60, 70, 80, 90dBA）加えて合計19個の音を刺激音とした。継続時間はすべて 50s である。

5.1.2 刺激音の作製

騒音レベル制御装置へ入力するプログラムを式(12)で計算して作成した。刺激音の作製に関するその他の事項は 4.1.2 に記載した通りである。

5.1.3 実験手法

4.1.3 に同じ。

5.1.4 被検者

被検者に関する記述は 4.1.4 と同じである。ただし、前節の実験に用いた被検者とは男子 2 名、女子 13 名が異なっている。全被検者を通じた 2 回の成績の相関係数は 0.841 である。

5.2 実験結果

4.2 の場合と同様にして実験成績を整理し、定常音の成績に基づいて各刺激音の ESL を計算した (Table 4)。 ϕ に対する音の強さのベキ指数は 0.296 であった。

Fig. 20 は ESL をレベル変動の周波数 f に対してプロットした図である。 $\bar{L}=70\text{dBA}$ 、 $\sigma=17.68\text{dB}$ の場合を除いては、 $f=0.1\text{Hz}$ において ESL が最大で、 $f=0.3\text{Hz}$ において ESL が最小になっているが、分散分析の結果有意差は認められなかった (有意水準; 0.05)。

正弦波状変動騒音はレベルが周期的に変動するので、被検者は刺激音を最初の数秒間聴いただけで、その音全

Table 4 Some physical characteristics of stimulus sounds and their Effective Sound Levels. (Sinusoidally fluctuating noise)

Duration : 50 (s)

Steady noise :

Sound level (dBA) ; 60, 70, 80, 90

Fluctuating noise :

$\sigma(\text{dB})$	$f(\text{Hz})$	$\bar{L}(\text{dBA})$	$L_{eq}(\text{dBA})$	$ESL(\text{dBA})$
3.54	0.1	70	71.3	74.4
	0.3			72.4
	1.0			73.1
	0.1	86	87.3	92.7
	0.3			91.6
	1.0			91.2
10.61	0.1	70	78.5	82.6
	0.3			79.7
	1.0			80.6
	0.1	79	87.5	91.6
	0.3			90.8
	1.0			88.1
17.68	0.1	70	87.3	89.3
	0.3			91.1
	1.0			90.0

体のうるさを予想することができるという難点がある。これを避けるため、レベルの変動をランダムにしておかつ変動周波数の影響を検討する実験を次に行なった。

なお、この実験の成績を用いて、 σ とうるささとの関係等の検討ができるが、これは後にまとめて考察する。

6. 2 次の自己回帰型ランダム変動騒音

後述するように、2 次の自己回帰過程では、コレログラムは指数余弦・指数正弦型となり、これのフーリエ変換として得られるパワースペクトルは、Fig. 21(d) に例示したように特定の周波数 f_0 において卓越し、 f_0 以上の周波数領域で急墜する。 f_0 が低くなると (Fig. 21(c)) f_0 におけるパワースペクトルの卓越はみられないが、 f_0 以上の周波数領域でのパワースペクトルの急墜は認めら

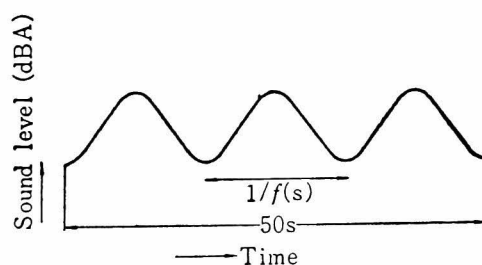


Fig. 19 A typical time pattern of sinusoidally fluctuating noise.

Sound level of each sound begins in the phase shown here.

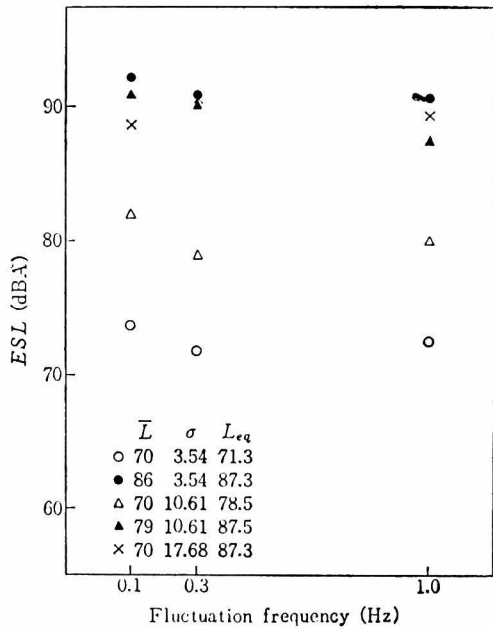


Fig. 20 ESL vs. frequency of level fluctuation (f).
(Sinusoidally fluctuating noise)

れる。この性質を利用して、ランダム変動騒音のレベル変動の周波数とうるささとの関連について検討する実験を行なった。このコレログラムの型は市街地における交通騒音のコレログラム¹²⁾に近い。

6.1 実験方法

6.1.1 刺激音

X_t を無相関の確率変数, α, β を定数とすれば,

$$Y_t = \alpha Y_{t-1} + \beta Y_{t-2} + X_t \quad (t = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots) \quad (15)$$

で得られる Y_t の平均値 \bar{Y}_t と分散 σ_Y^2 は次式で表わされる¹¹⁾。

$$\bar{Y}_t = \bar{X}_t / (1 - \alpha - \beta) \quad (16)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{(1 - \beta)}{(1 + \beta)(1 - \alpha - \beta)(1 + \alpha - \beta)} \cdot \sigma_X^2 \quad (17)$$

ここに \bar{X}_t は X_t の平均値, σ_X^2 は X_t の分散である。

また, Y_t のコレログラム (ρ_k) は次式で表わされる。

$$\rho_k = \mu^k \cos k\theta + \frac{1 - \mu^2}{1 + \mu^2} \mu^k \cot \theta \cdot \sin k\theta \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (18)$$

ただし, μ, θ は λ に対する 2 次方程式

$$\lambda^2 - \alpha\lambda - \beta = 0 \quad (19)$$

の 2 根を共役複素数 $\lambda_1 = \mu \exp(i\theta)$, $\lambda_2 = \mu \exp(-i\theta)$ ($i = \sqrt{-1}$) とおいた時の値である。

今, Δt s ごとにレベルを変動させるとすれば,

$$\tau = k \cdot \Delta t \quad (20)$$

$$a = -\ln \mu / \Delta t \quad (21)$$

$$c = \cot(2\pi f_0 \Delta t) \frac{1 - \exp(-2a\Delta t)}{1 + \exp(-2a\Delta t)} \quad (22)$$

$$\alpha = 2 \exp(-a\Delta t) \cdot \cos(2\pi f_0 \Delta t) \quad (23)$$

$$\beta = -\exp(-2a\Delta t) \quad (24)$$

とおくことにより, Y_t の自己相関関数 $R(\tau)$ は,

$$R(\tau) = \exp(-a|\tau|) \cdot (\cos 2\pi f_0 \tau + c \sin 2\pi f_0 |\tau|) \quad (25)$$

と表わされ, 片側パワースペクトル密度関数 $G(f)$ は

$$G(f) = \frac{2a + 4\pi c(f + f_0)}{a^2 + 4\pi^2(f + f_0)^2} + \frac{2a - 4\pi c(f - f_0)}{a^2 + 4\pi^2(f - f_0)^2} \quad (26)$$

となる。式(15)ないし(19)より明らかに, $\Delta t, \beta, f_0$ を定めると他のパラメータは定まる。今の場合, $\Delta t = 0.1$, $\beta = -0.8$ とし, f_0 は Table 3 に記載したように 4 種類定めた。

この f_0 のおのおのの値について σ が 3 種類となるようにして, 12 個の変動騒音を作製した。これらはすべて, レベルの平均値 $\bar{L} = 70 \pm 0.5$ dBA とし, 継続時間は 50 s とした。更に定常音を 4 個 (レベルは 65, 75, 85, 95 dBA) 加えて, 合計 16 個の騒音を刺激音とした。

Fig. 21 (a), (b) には刺激音のコレログラムの, また, Fig. 21 (c), (d) にはパワースペクトルの例を示す。図中の実線は式(25)及び式(26)から計算した値であり, プロットした点は刺激音から計算した値である。パワースペクトルの計算には Blackman-Tukey 法¹³⁾を用いた。

Fig. 22 (a)~(d) に $\sigma = 10$ dB の場合の刺激音のレベル変動を示した。レベルの分布すなわち Y_t の分布は正規分布である¹¹⁾。

Table 5 Some physical characteristics of stimulus sounds and their Effective Sound Levels.

(Randomly fluctuating noise of Yule series type)

Duration : 50 (s)

Steady noise :

Sound level (dBA) : 65, 75, 85, 95

Fluctuating noise :

σ (dB)	f_0 (Hz)	\bar{L} (dBA)	L_{eq} (dBA)	ESL(dBA)
5.4	0.1	69.8	72.9	73.0
5.1	0.3	70.5	73.5	73.2
5.3	0.5	69.9	73.0	72.2
5.1	1.0	70.1	73.2	73.6
10.8	0.1	70.1	80.4	79.8
10.2	0.3	70.5	81.3	82.0
10.6	0.5	70.3	81.6	81.9
10.1	1.0	69.8	81.4	82.1
15.6	0.1	69.7	88.7	89.1
15.8	0.3	70.4	89.9	90.6
15.3	0.5	69.7	89.6	90.3
16.0	1.0	70.0	89.9	92.6

6.1.2 刺激音の作製

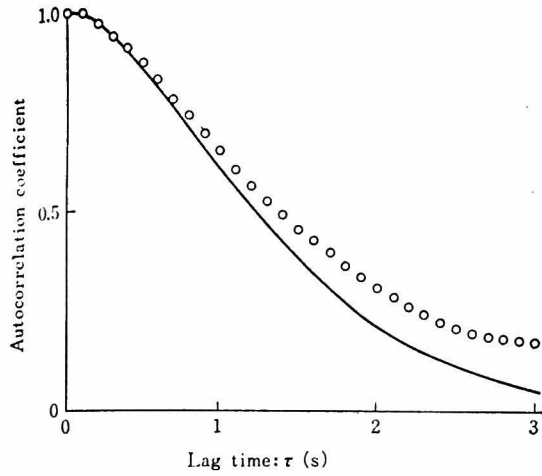
4.1.2 と同じ。

6.1.3 実験手続

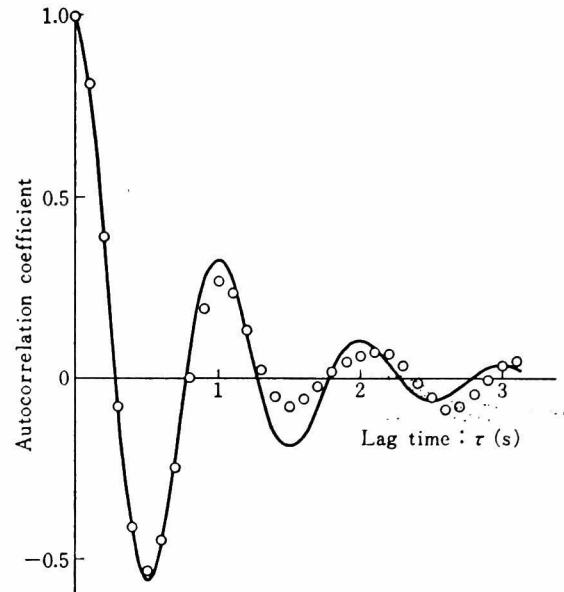
4.1.3 と同じ。

6.1.4 被検者

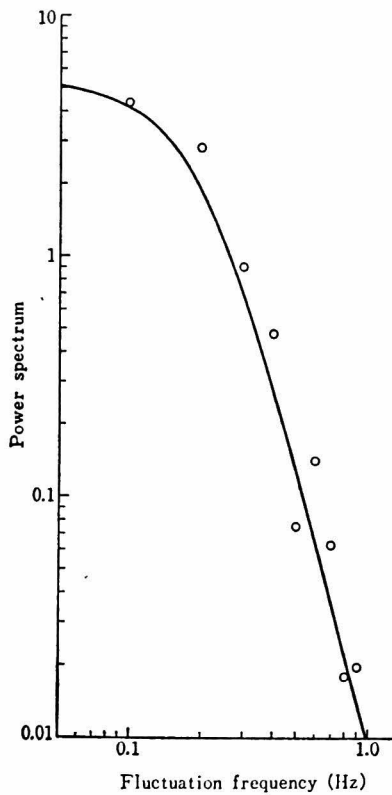
4.1.4 で記述した通りである。ただし, 被検者は前節で



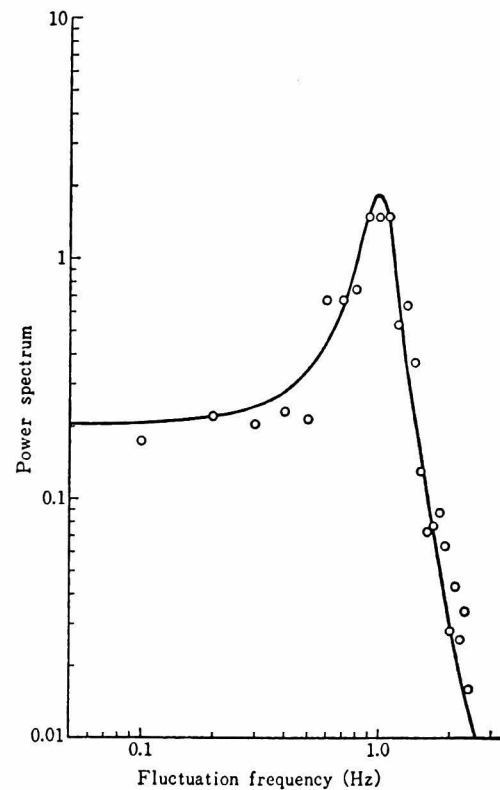
(a) $f_0=0.1$ Hz, $\sigma=10.8$ dB



(b) $f_0=1.0$ Hz, $\sigma=10.1$ dB



(c) $f_0=0.1$ Hz, $\sigma=10.8$ dB



(d) $f_0=1$ Hz, $\sigma=10.1$ dB

Fig. 21 Correlograms [(a), (b)] and power spectra [(c), (d)] of level fluctuations of randomly fluctuating noises of Yule series type.

用いた被検者と男子2名、女子2名異なる。全被検者を通じた2回の相関係数は0.843である。

6.2 実験結果

4.2で記述したのと同様にして ESL を求め実験結果とした。定常音の成績で得られた ψ に対する音の強さのベキ指数は0.299であった。 ESL の値は Table 5 に記載した。

Fig. 23 では f_0 に対して ESL をプロットした。ただ

し、 σ がほぼ等しくても L_{eq} に僅かな異同があるので、 L_{eq} が図中に示した値になるよう ESL の値を最大 1.3 dB 補正した。 $\sigma=15$ dB の場合、 $f_0=1$ Hz においてやや ESL が増大している。これはこの刺激音が衝撃性の成分を多く含んでいるためと考えられる。しかし、分散分析の結果では f_0 によって ESL に有意な差は認められなかった (有意水準; 0.05)。

正弦波状変動騒音の成績と2次の自己回帰型ランダム

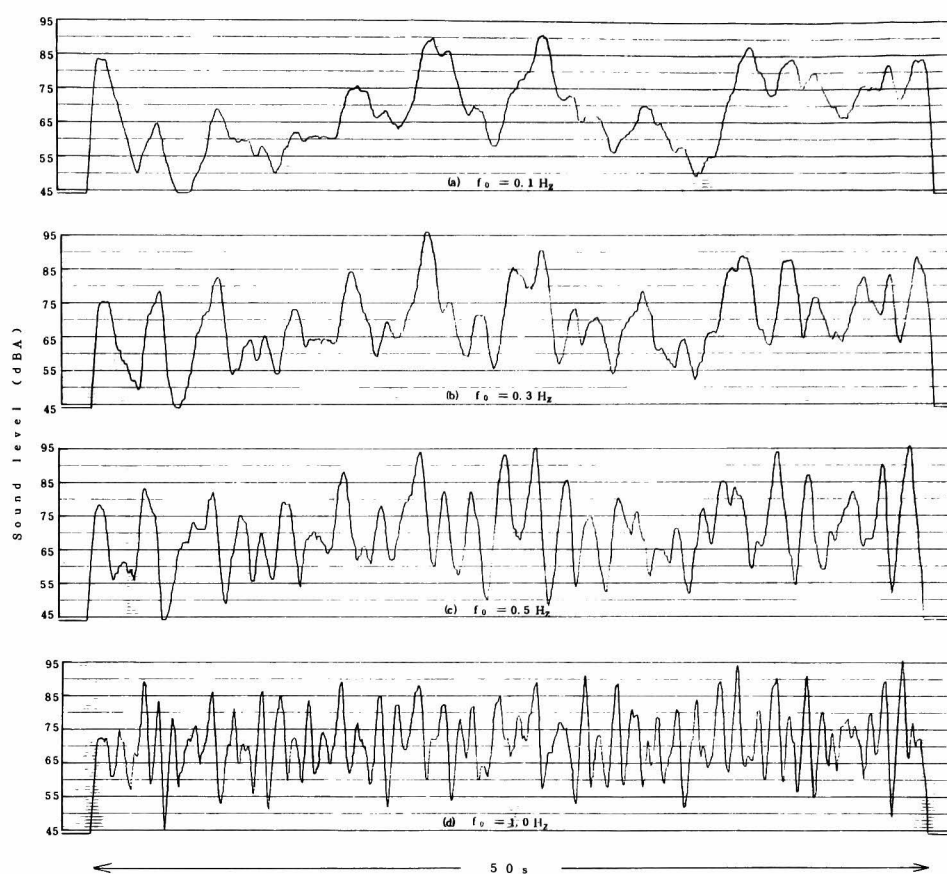


Fig. 22 Level fluctuations of randomly fluctuating noise of Yule series type.

$\bar{L}=70\pm0.5$ dBA, $\sigma\pm10$ dB, writing speed=100dB/s.

変動騒音の成績とから、レベルの変動周波数が0.1ないし1 Hzの範囲では、うるささに著明な影響を及ぼさないと言える。また、1 Hz以上の周波数範囲については、鋸歯状変動騒音を用いて行なった同様の実験成績¹⁴⁾から

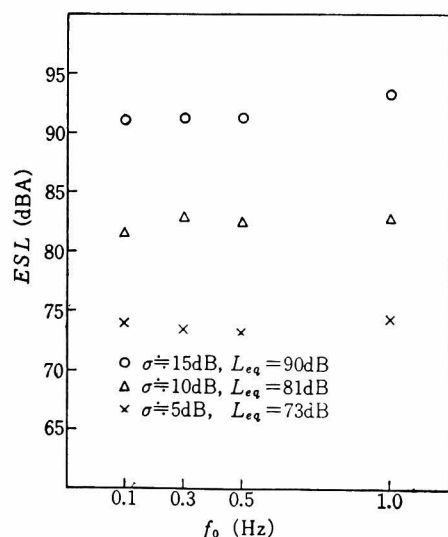


Fig. 23 ESL vs. f_0 of randomly fluctuating noise of Yule series type. Values of ESL are slightly corrected so that the sounds having an almost equal standard deviation have a value of L_{eq} and plotted here.

みて、極端に衝撃的な成分を含む変動でない限り、うるささが大きく増大することはないと推定される。

0.1 Hz 及び 1 Hz の変動周波数に対する Nyquist 間隔は 5 s 及び 0.5 s であるから、騒音レベルのサンプリング時間間隔を 5 s 以下に短縮することは、うるささの観点からは必要ではない。また、0.5 s 以下の時間間隔でサンプリングすることは、実際的とは思われない。0.5 s 以下の時間領域ではむしろ測定計器の動特性が問題となるからである。

サンプリング時間間隔を 5 s 以上に延長することの当否及びサンプリング個数を 50 個とすることの当否についての検討を行なうには、より低い周波数領域における成績が必要であり、今後の課題として残される。

7. 考 察

7.1 レベル変動の標準偏差とうるささ

レベル変動の標準偏差 σ とうるささとの関係については 4.2 ですでに論じたが、ここでは今回の 3 種類の変動騒音に関する実験成績と、鋸歯状変動騒音を用いた実験の成績¹⁴⁾をも含めてこの問題を検討する。

これらの刺激音は 82 個あり、 \bar{L} や L_{eq} の値は区々であるので、例えば \bar{L} が同じ値をとる場合については、うるささと σ との関係を検討するために、次のように ESL

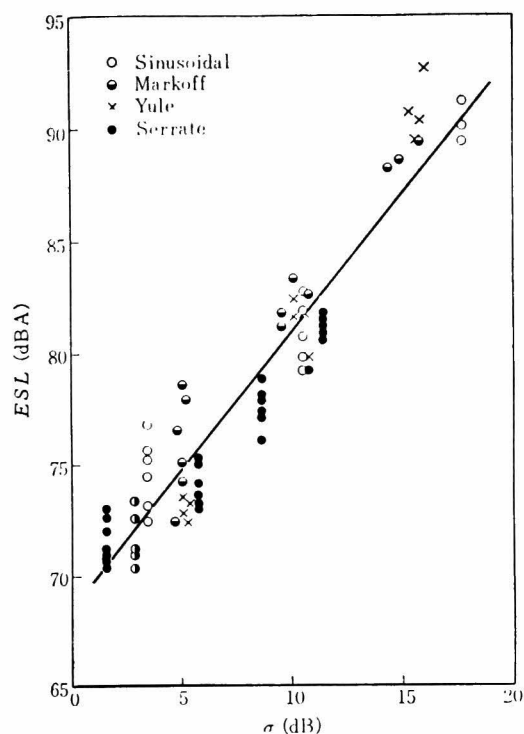


Fig. 24 *ESL* vs. standard deviation of sound level (σ). Data were corrected by adding $(70 - \bar{L})$ to *ESLs*. Serrate means there sults for serrately fluctuating noise¹³⁾. Solid line shows the regression line. Dispersion in *ESL* values for an equal standard deviation is due to other factors of level fluctuation, correction of *ESLs*, and measurement errors.

を補正した。すなわち、 $\bar{L}=70\text{dBA}$ を仮に基準のレベルとして、刺激音の \bar{L} が 80dBA の場合には、その刺激音の *ESL* から 10dB 引いた値を実験成績とする。これは当該刺激音が全体に 10dB 減衰した場合、*ESL* も平行して 10dB 減衰すると仮定している。

$\bar{L}=70\text{dBA}$ として上記のように *ESL* を補正し、横軸に σ をとってプロットしたのが Fig. 24 である。この場合、 σ の増加に伴って *ESL* が増加している。図中の直線は最小自乗法で求めた回帰直線である。この回帰直線は

$$ESL = 1.232\sigma + 68.52 \quad (27)$$

で表わされ、相関係数は 0.952 である。

これより、変動騒音の評価尺度として $\bar{L} + \sigma$ が用いられるのではないかと考えられる。これは次項で検討する。

次に $L_{eq}=88\text{dBA}$ となるように *ESL* を補正して同様にプロットしたのが Fig. 25 である。図からわかるように、データはばらついており、 σ の変化に伴う *ESL* の変化は認められない。事実、回帰分析を行なった結果、回帰係数は -0.00095 であり、相関係数は -0.0030 と極めて低い値である。したがって、 L_{eq} が一定の場合、 σ によってうるさは変わらないと考えられる。*NPL* は変動成分を過大に評価しているという指摘¹⁵⁾はこの成績からも支持される。また、交通騒音のうるさを室内実験で測定した結果、*NPL* 及び *TNI* はうるささの評

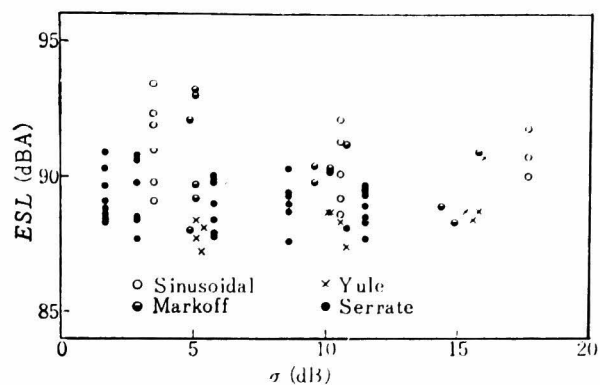


Fig. 25 *ESL* vs. standard deviation of sound level (σ). Data are corrected by adding $(88 - L_{eq})$ to *ESLs*. Dispersion in *ESL* values for an equal standard deviation is due to other factors of level fluctuation, correction of *ESLs*, and measurement errors.

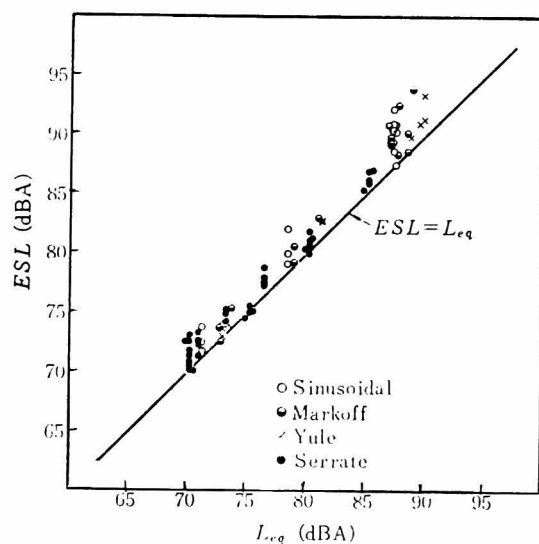


Fig. 26 *ESL* vs. L_{eq}

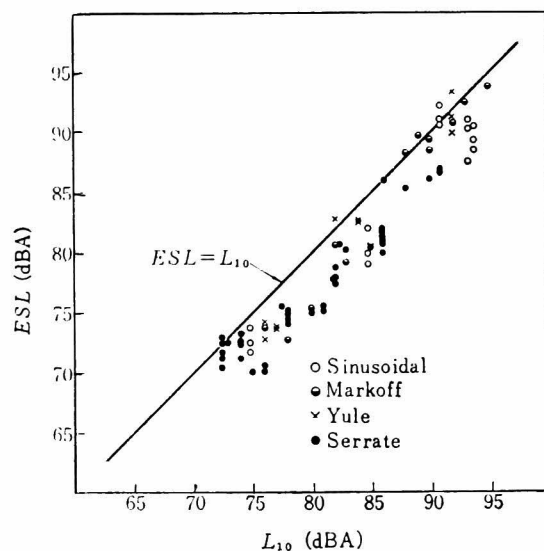


Fig. 27 *ESL* vs. L_{10}

値に不適であるという成績¹⁶⁾とも一致する。更に, Matschat et al.⁴⁾によれば, NPL の値は等しいが種類の異なる騒音を継ぎ合わせて1個の騒音を作れば, 合成された騒音の L_{eq} 及び σ は個々の騒音のそれらの値とは異なり, NPL も異なる値となる。したがって, 種類の異なる騒音の評価の比較をしたり, 1日の中で異なる種類の騒音に暴露される個人の総合的なうるさを評価するためには NPL は不適当であると言う。 NPL の妥当性を支持する報告¹⁷⁾も行なわれてはいるが, 叙上の報告及び今回の実験成績からみて, 変動騒音の評価に NPL を用いるには慎重を期すべきであると考えられる。

7.2 変動騒音の評価尺度

変動騒音の評価尺度として提案されている NPL と TNI はうるささとの相関が低く, 適切な評価尺度とは言えないことは既に述べた。また, L_{eq} や L_{10} はレベル変動を表わす項を具体的には含んでいないが, 変動騒音の評価によく用いられている。ここでは, これらの4評価尺度の他に, \bar{L} , L_5 , L_{20} , L_{50} 及び前項で述べた $\bar{L}+\sigma$ の9種類の評価尺度の妥当性について検討する。

L_{eq} , L_{10} , $\bar{L}+\sigma$ に対して ESL をプロットした図を Fig. 26, 27, 28 に示す。図中の直線は ESL が L_{eq} , L_{10} , $\bar{L}+\sigma$ とそれぞれ等しい関係を示しており, 定常音の成績とみなし得る。Fig. 26 では ESL は直線の上側に分布しており, L_{eq} によって変動騒音の評価すればやや過小評価になることがわかる。しかし, 全体的には L_{eq} の増加と ESL の増加とがよく一致している。Fig. 27 では逆に, ESL が直線の下側に分布しており, L_{10} による評価は過大となることがわかる。Fig. 28 では ESL はほぼ直線の両側に分布しているが, ばらつきがやや大きい。

これら9種類の評価尺度の良否を検討するため, 最小自乗法で求めた ESL の評価尺度に対する回帰直線の回帰係数と相関係数及び $\overline{ESL}-\bar{X}$ を Table 6 に記載した。ここに \overline{ESL} は ESL の平均値, \bar{X} は評価尺度 X の平均値である。 $|\overline{ESL}-\bar{X}|$ は測定値群の重心と $ESL=X$ の直線との ESL 方向の隔たりを表わしている。一般に, 相関係数が高い程よい評価尺度であり, 更に TNI を除いては回帰係数が1に近い程, また $\overline{ESL}-\bar{X}$ は0に近い程よい評価尺度である。この観点から Table 4 の諸量を検討すれば, \bar{L} , L_{50} , NPL , TNI は適切な評価尺度ではなく, L_{eq} , L_{10} , $\bar{L}+\sigma$ が適切な評価尺度であると言える。 L_5 は $\overline{ESL}-\bar{X}$ において, L_{20}

は相関係数において上記の3種の評価尺度に比べてやや劣るようである。上記の3種の評価尺度のうち, どの評価尺度が最もよいかということは現段階では結論を下しにくい。これは一つにはここで用いた刺激音では例えば L_{eq} と L_{10} とがほぼ等しいためである。 L_{eq} , L_{10} , $\bar{L}+\sigma$ 等が互に大きく異なる刺激音を用いた場合については後述する。

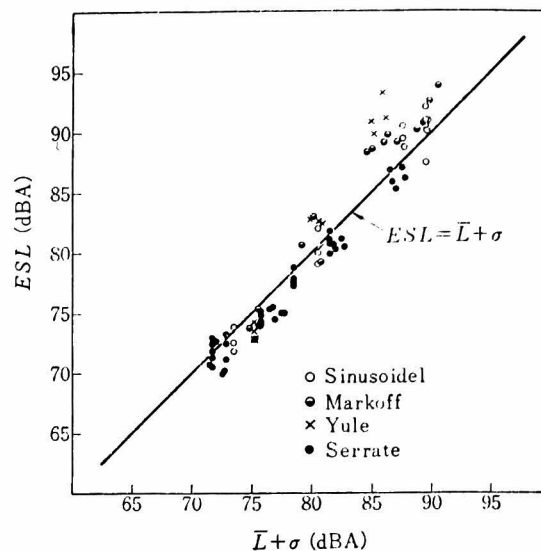


Fig. 28 ESL vs. $\bar{L}+\sigma$

8. 結 論

1 次の自己回帰型ランダム変動騒音, 正弦波状変動騒音, 2 次の自己回帰型ランダム変動騒音のうるさを測定した結果, 次のことが明らかとなった。

- (1) レベルの変動速度は 20 ~ 200 dB/s の範囲でうるさに影響しない。
- (2) 騒音のうるさは 0.1 Hz ないし 1 Hz の範囲ではレベルの変動の周波数によって変化しない。
- (3) \bar{L} が一定ならレベルの標準偏差 σ の増加とともにうるさも増加するが, L_{eq} が一定なら σ によってうるさは変化しない。
- (4) 変動騒音の評価尺度として提案されている TNI , NPL は実効騒音レベル (ESL) との相関が低く, 上記変動騒音の評価尺度としては好ましくない。

Table 6 Correlation coefficients, regression coefficients, and deviations of \overline{ESL} at $X=\bar{X}$ from the line of $ESL=X$ for various indices (X).

X	\bar{L}	L_{50}	NPL	TNI	L_{eq}	L_5	L_{10}	L_{20}	$\bar{L}+\sigma$
Correlation coefficient	0.606	0.594	0.780	0.580	0.987	0.957	0.958	0.916	0.967
Regression coefficient	0.805	0.784	0.348	0.112	1.083	0.932	1.019	1.097	1.179
$\overline{ESL}-\bar{X}$	8.02	8.20	-19.0	-31.7	1.35	-4.51	-2.47	0.41	0.16

- (5) L_{eq} , L_{10} , $\bar{L} + \sigma$ は実効騒音レベル (ESL) との関係係数, 回帰係数, 測定値群の重心の位置からみて上記変動騒音に関しては, 優れた評価尺度であり, L_{20} , L_5 はこれにつき, \bar{L} , L_{50} は好ましくない。

参 考 文 献

- 1) I. D. Griffiths and F. J. Langdon : "Subjective response to road traffic noise" J. Sound Vib., 8 (1) (1968) p. 16
- 2) D. W. Robinson : "The concept of Noise Pollution Level" NPL Aero Rep., Ac 38 (1969)
- 3) J. L. Muller : "Assessment of annoyance due to varying noise levels with particular reference to aircraft noise" J. Sound Vib., 19 (3) (1971) p. 287
- 4) K. Matschat, E. A. Müller, and G. Zimmermann : "On the formulation of noise indices" ACUSTICA, 37(1977) p. 267
- 5) von G. Stumpner, G. Urbanek, und W. Wehrmann : "Relativbewertung der Lästigkeit experimenteller, stochastischer Geräusche" ACUSTICA, 24 (1971) S. 1
- 6) 難波精一郎, 中村敏枝, 安田園子 : "レベル変動音の大きさについて" 心研 42 (2) (1971) p. 93
- 7) 難波精一郎, 中村敏枝, 安田園子 : レベル変動音の大きさについて (続) "エネルギー平均値との関係一" 心研, 43 (5) (1972) p. 251
- 8) 賀戸久, 服部昭三, 永村寧一, 八木昭宏, 口ノ町康夫 : "変動騒音の心理計測に関する研究" 昭和51年度環境保全成果集 68 (1976)
- 9) 難波精一郎, 中村敏枝, 安田園子 : "音刺激制御装置の試作," 心研, 43 (6) (1973) p. 307
- 10) 山下正信 : 未発表資料 (私信による)
- 11) M. G. Kendall : "Time-Series" (1973) Griffin, London, p. 71
- 12) 山下正信 : 信号近辺における自動車騒音のパターン化について, 大阪府公害監視センター所報, 調査研究編昭和50年度 (1976) p. 45
- 13) R. B. Blackman and J. W. Tukey : "The measurement of power spectra" (1958) Dover, N. Y.
- 14) 平松幸三, 横江齊, 高木興一, 山本剛夫 : "騒音レベルの変動巾及び変動速度とうるささとの関係 (鋸歯状変動騒音による実験)" 日本公衛誌, 26 (5) (1978) p. 253
- 15) Wyle Staff : "Supporting information for the adopted noise regulations for the California Department of Aeronautics", cited in "Effects of noise on people", by J. D. Miller, JASA, 56 (3) (1974) p. 729
- 16) P. Voigt, T. Pelli, A. Lauber, J. Nemecek, and E. Grandjean : "Traffic noise and annoyance in a laboratory condition" Sozial-und Präventivmedizin, 19 (1974)p. 197
- 17) C. A. Powell and C. G. Rice : "Judgments of aircraft noise in a traffic noise background" J. Sound Vib., 38 (1) (1975) p. 39

Appendix A Observed Effective Sound
Levels of serrately fluctuating
noises used in the experiment I

dL/dt (dB/s)	ΔL (dB)	ESL (dBA)
20	6	72.4
40	6	71.2
80	6	71.8
200	6	73.0
20	10	72.5
40	10	72.5
80	10	71.1
200	10	73.3
20	20	74.9
40	20	74.1
80	20	75.1
200	20	74.0
20	30	77.8
40	30	78.7
80	30	77.7
200	30	77.4
20	40	81.7
40	40	81.1
80	40	79.9
200	40	80.7

Appendix B Observed Effective Sound
Level of serrately fluctuating
noises used in the experiment II

dL/dt (dB/s)	ΔL (dB)	ESL (dBA)
20	6	70.4
40	6	74.5
80	6	80.7
200	6	85.9
20	10	69.7
40	10	74.4
80	10	80.2
200	10	85.2
20	20	70.1
40	20	75.0
80	20	80.5
200	20	86.1
20	30	70.0
40	30	75.0
80	30	81.2
200	30	87.0
20	40	70.7
40	40	75.5
80	40	81.8
200	40	86.8

第6章 騒音のうるささに関する 等エネルギー仮説の検討

第6章 騒音のうるささに関する等エネルギー仮説の検討

1. はじめに

鋸歯状変動騒音¹⁾、正弦波状変動騒音²⁾、1次および2次の自己回帰型変動騒音³⁾を用いた室内実験の結果、変動騒音の評価尺度として提案されている TNI, NPL とうるささとは対応が悪く、 L_{eq} , L_{10} , $\bar{L}+\sigma$ (\bar{L} はレベルの算術平均, σ はレベルの標準偏差) が比較的良好にうるささに対応することが明らかとなった。しかし、上記の刺激音では、 L_{eq} , L_{10} , $\bar{L}+\sigma$ の値が互いにはほぼ等しいため、これらの評価尺度の優劣を決定することができなかった。本章ではこれらの評価尺度の値が互いに異なる刺激音を用いて実験し、これらの評価尺度のいずれがうるささによく対応するかを検討する。更にいわゆる「等エネルギー仮説」を検討するため、騒音のエネルギーは全く又はほぼ等しいがレベルの時間的変動のパターンの異なる刺激音を用いてそのうるさを測定する実験を行った。

2. 一車線等間隔モデルに基づく道路交通騒音の模擬音を用いた実験 (実験1)

交通流として一車線等間隔モデル³⁾を想定した場合、受音点における L_{eq} に対する相対的な騒音レベルは、車頭間隔を S 、車線から受音点までの距離を d とすると、 d/S によって決まる。すなわち、 L_{eq} , L_{10} , L_{50} 等は d/S が小さい場合にはそれぞれ異なった値をとるが、 d/S が大きくなるといずれもほぼ同じ値に近づく。この知見を利用して、 L_{eq} , L_{10} , $\bar{L}+\sigma$ の異なる刺激音を作製し、そのうるさを測定してこれらの3評価尺度のうちいずれがうるささによく対応するかを検討した。

2.1 実験方法

2.1.1 刺激音

一車線等間隔モデルを想定した場合、車線から距離 d 離れた受音点における騒音レベル L_A (dBA) は、個々の車輛から発生する騒音は、球面波伝播をすると仮定して、

$$L_A = 10 \log \frac{1}{4dS} \cdot \frac{\sinh(2\pi d/S)}{\cosh(2\pi d/S) - \cos(2\pi x/S)} + \text{PWL} \quad (1)$$

で示されている³⁾。ここに、PWL は音源のパワーレベル (dBA)、 x は受音点から車線に下した垂線の足とそこを通過した最後の車輛との距離である。

また、 L_{eq} , \bar{L} , L_{10} , σ は次式で表わされる⁴⁾。

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{4dS} + \text{PWL} \quad (2)$$

$$\bar{L} = 10 \log \frac{1}{2dS} \cdot \frac{1}{\coth(2\pi d/S) + 1} + \text{PWL} \quad (3)$$

$$L_{\alpha} = 10 \log \frac{1}{4dS} \cdot \frac{\sinh(2\pi d/S)}{\cosh(2\pi d/S) - \cos(\alpha \cdot \pi/100)} + \text{PWL} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = 2 \cdot \left(\frac{10}{\ln 10} \right)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{4\pi d}{S} n\right) \quad (5)$$

ここに L_{α} は騒音レベルの α パーセンタイル値である。

S および d の値は、 $S=100\text{m}$ とし、 $d=0.2\sim 25.6\text{m}$ とした。 $d=25.6\text{m}$ のとき L_{eq} と L_{10} とは 1.1 dBA 異なり、 $d=0.2\text{m}$ の時両者は 6.4 dBA 異なる。Table 1 に、刺激音の物理性状を記載した。車の走行速度を通常の走行速度とすると d/S の小さい場合に、刺激音は衝撃音のようになるので、これを避けるため 1 周期が 20s となるように走行速度を設定した。今回の実験に用いた刺激音ではレベルの変動速度が 100 dB/s を超えることはない。刺激音には、レベル変動の 1 周期 (20s) 分のみを用いた。

d の 8 種の値に従って変動騒音を 8 個作り、これに定常音 (レベルは 60, 70, 80, 90 dBA) を加えて合計 12 個の刺激音を用いた。

Fig. 1 に刺激音のレベル変動をレベルコーダーで描かせた図の例を示す。

Table 1 Some physical characteristics of stimulus sounds used in Experiment 1 and their ESLs (Traffic noise simulated on the basis of equally spaced vehicles model).

Steady noise

Duration (s); 20

Sound level (dBA); 60, 70, 80, 90.

Simulated traffic noise

PWL (dBA); 93.4

Car speed (km/h); 18

Duration (s); 20

S (Spacing) (m); 100

d (distance) (m)	L_{eq} (dBA)	Mean ESL and its 95% confidence limits (dBA)
0.2	74.4	74.3±1.1
0.4	71.4	70.9±0.7
0.8	68.4	68.4±0.8
1.6	65.4	65.8±1.1
3.2	62.4	65.2±1.1
6.4	59.4	61.6±1.7
12.8	56.4	56.8±2.6
25.6	53.4	53.1±3.4

2.1.2 刺激音の作製

正弦波ランダム信号発生装置 (B & K, 1024) で発生させたホワイトノイズをユニバーサルフィルター (JEI C, UF-4) に通し、80 Hz 以下および 10000 Hz 以上を切断した信号を騒音レベル制御装置 (森技研, SG-112) に入力し、そのレベルを所定のプログラムに従って制御した。騒音レベル制御装置に入力するプログラムは、式 (1) によって計算した騒音レベルに基づいて作成した。騒

音レベル制御装置の出力信号は周波数イコライザー (Technics, SH-9090), 増幅器 (SONY, 3200F) を経て, ヘッドホン (STAX, SR-X) に入力した。周波数イコライザーはヘッドホンで発生される音の周波数構成を調整するために用いた。

刺激音の分析および監視には, 人工耳 (B & K, 4153), 精密騒音計 (B & K, 2203), 周波数分析器 (B & K, 2120) およびレベルレコーダー (B & K, 2305) を用いた。刺激音の 1/3 オクターブバンドレベルは中心周波数 125~8000 Hz の範囲で 3dB/oct. の傾きを有する直線に対し, ± 1.5 dB の範囲内にあった。

2.1.3 実験手法

上記刺激音のうち, 8 種の変動騒音は各 2 個ずつ, また 4 種の定常音は各 1 個ずつ合計 20 個の刺激音をランダムに配置して 1 つの刺激系列を作った。刺激間の時間間隔 (off-time) は 10s にした。また, その逆順に刺激音を配列した系列を作り, 正逆両順の刺激系列対を作った。このような刺激系列対を 5 対作り, そのうちの 1 対を 1 人の被検者に呈示した。したがって, 1 人の被検者に対して同一の定常音は 2 回, また同一の変動騒音は 4 回ずつ呈示されている。刺激音の呈示はヘッドホン (両耳) により防音室内 (室内暗騒音 25 dBA 以下) で行なった。

うるささの測定はマグニチュード評価法 (method of magnitude estimation) によった。点数の用い方は被検者の任意とし, modulus (規準となる刺激) は用いていない。ただし, 数値は相対的な比の値が意味を有することをよく説明した。音のうるささの判定においては単に音が大きい小さいだけでなく, 耳障りであると

か, 不快であるとかいった感じをも含めて総合的な印象に基づいて評価するよう教示した。

2.1.4. 被検者

聴力正常な青年 (19 才~26 才) 男女各 15 名ずつ計 30 名を被検者に採用した。

各被検者には本実験に入る前に 10 数種の長さの線分およびレベルが 50~95 dBA の騒音を用いて, magnitude estimation および magnitude production の練習を十分行なわせた後, 代表的な刺激音を 3~4 例聴取させ, かつその評価を試みさせた。

30 名の被検者の中には正逆両刺激系列順間の成績の相関のよくない者がいる。今回の実験では正逆両順間の成績の相関係数が 0.6 以下の者は除外し (母相関係数 = 0 を危険率 1% 以下で棄却), 別の被検者を新たに採用した。全被検者を通じた 2 回の成績の相関係数は 0.781 であった。

2.2 実験結果

各被検者は刺激音に対して任意に点数をつけており, 点数は刺激音の相対的な比のみが意味を有するので, 次のようにしてデータを整理した。まず, 各被検者が評点した数値を対数変換して, 全被検者の全刺激音に対する平均値を求める。次に各被検者のすべての評点の平均値が上記の平均に一致するようおのおのの評点を補正する。こうすれば各被検者の評点は相対的な比の対数として互いに比較し得るデータとなる。実際には 70 dBA の定常音に対して得られた平均値がゼロ, すなわちうるささの比が 1 となるように全データを再補正して実験成績とした。

定常音の成績を Fig. 2 に示した。図からわかるよう

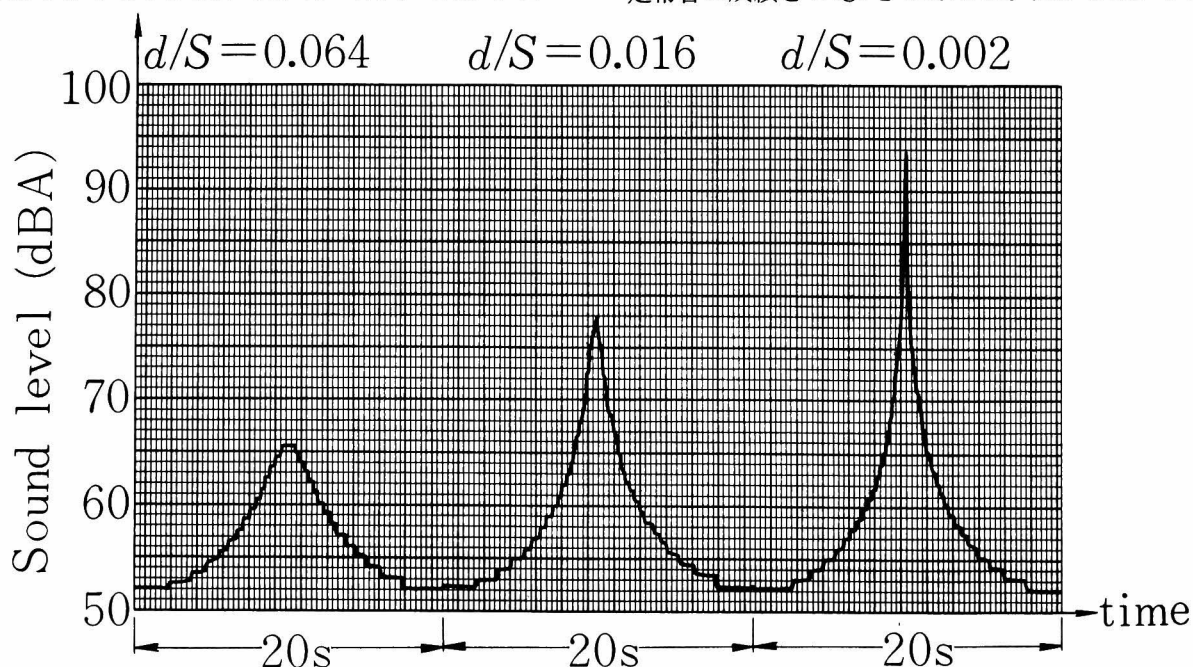


Fig. 1 Three examples of level fluctuations of stimulus sounds based on equally spaced vehicles model. Writing speed is 100dB/s.

にうるささの比の対数は定常音のレベルに対して線型関係にある。図中の直線は最小自乗法で求めた回帰直線であり、これはうるささの比を ψ とすれば次式で表わされる。

$$\log \psi = 0.0222 L_s - 1.554 \quad (6)$$

ここに L_s は定常音のレベルである。相関係数は 0.9997 であった。この回帰係数の値から ψ に対する音の強さのベキ指数は、この実験においては 0.222 である

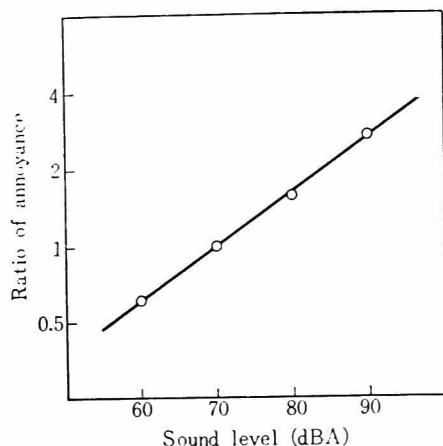


Fig. 2 Relation between ratio of annoyance and sound level of steady noise used in Experiment 1. Effective Sound Levels (ESLs) of traffic noises simulated on the basis of equally spaced vehicles model are calculated from this relation. ESL is the level of a steady noise which gives the equal annoyance to that of a fluctuating noise.

と知られる。 ψ として得られた変動騒音の成績を式(6)を用いて ESL (Effective Sound Level; 実効騒音レベル)¹⁾²⁾に換算した。

Fig. 3 では d/S を横軸に対数尺度でとり、ESL をプロットし、その95%信頼限界を線分で示した。図には式(2)~(5)で計算した L_{eq} , L_{10} , $\bar{L} + \sigma$, L_{50} の値を曲線で示した。図からわかるように、 d/S が大きい場合には L_{eq} , L_{10} , $\bar{L} + \sigma$, L_{50} は互いに近い値となり、ESL もこれらの値にほぼ等しい。 $d/S = 32 \times 10^{-3}$ と 64×10^{-3} の場合には、ESL は $\bar{L} + \sigma$ や L_{10} にやや近く、 $d/S = 2 \times 10^{-3}$ と 4×10^{-3} の場合には ESL は $\bar{L} + \sigma$ や L_{10} から離れて L_{eq} にほぼ一致している。

$d/S = 32 \times 10^{-3}$ および 64×10^{-3} において、 L_{eq} の値を母平均とみなして ESL の平均値が母平均に一致するかどうかを検定した結果、両者に有意差が認められた(有意水準=0.05)。しかし、 L_{eq} と $\log(d/S)$ との関係を示す直線を ESL の $\log(d/S)$ に対する母回帰直線とみなした場合に、ESL の $\log(d/S)$ に対する回帰直線が母回帰直線に一致するかどうか検定した結果、有意差は認められなかった。以上のことから、 L_{eq} , L_{10} , $\bar{L} + \sigma$ のうちでは L_{eq} がうるささに最もよく対応し、 L_{10} と $\bar{L} + \sigma$ とはうるささとの対応が L_{eq} に劣るといえる。 L_{eq} が L_{10} に比べて心理量との対応がよいという成績は難波ら⁵⁾の成績と符合する。

3. 等エネルギー仮説の検討(実験2, 3)

前節の成績から、 L_{eq} がうるささの評価尺度としてす

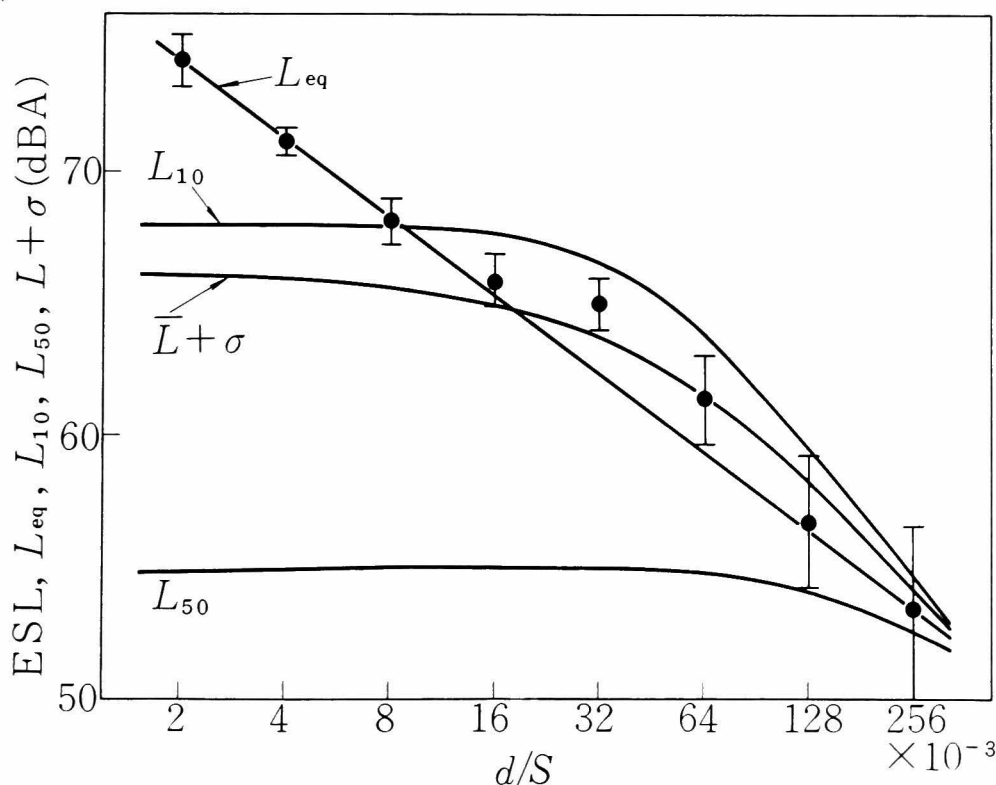


Fig. 3 Comparison of ESL of simulated traffic noise with L_{eq} , L_{10} , $\bar{L} + \sigma$, L_{50} . Vertical bars show 95% confidence limits of mean ESLs.

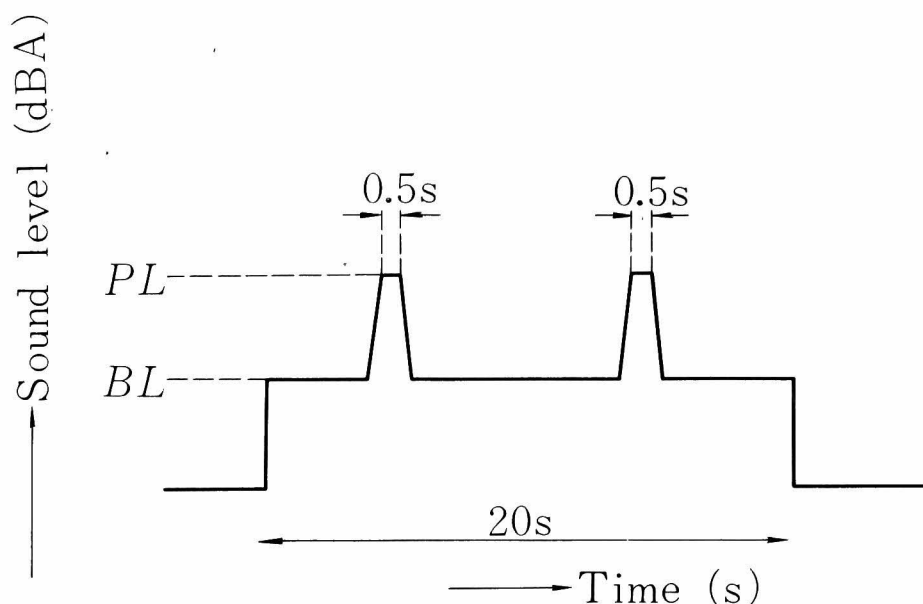


Fig. 4 A time pattern of level fluctuation of convex type sound.

Rising or decaying speed between BL and PL is 100dB/s.

L_{eq} is shown as the following formula,

$$L_{eq} = 10 \log \left[\left\{ 4 \times 10^{\frac{BL}{10}} \cdot \frac{10 \log e}{m} \left(10^{\frac{m \Delta t}{10}} - 1 \right) + 10^{\frac{PL}{10}} \times t_P + 10^{\frac{BL}{10}} \times t_B \right\} / 20 \right],$$

where m is the absolute value of rising or decaying speed between PL and BL, Δt is rise or fall time between PL and BL, t_P is the total duration of PL and t_B is the total duration of BL.

ぐれていることが知られた。しかし、騒音の総エネルギー又はエネルギーの平均値が等しければうるささも等しいとする、いわゆる「等エネルギー仮説」が成立するかどうかは疑問である。ここでは、この問題を検討するため、刺激音のレベルが主としてピークレベル (PL) とバックグラウンドレベル (BL) のみである音ならびに継続時間内にレベルが上昇もしくは下降し続ける音を用いて実験を行なった。

3.1 実験方法

3.1.1 刺激音

Fig. 4 に示すようなレベルの時間的変動パターンを示す騒音をここでは凸型変動騒音と称する。凸型変動騒音はほとんどピークレベルとバックグラウンドレベルとからなり、20s の継続時間中ピークが2回発生し、おのおののピークは 0.5s の継続時間を有する。ピークの発生する位置はランダムである。BL から PL に到り、あるいは逆に PL から BL に到る部分には 100 dB/s の傾斜を設けた。

この刺激音の場合、BL が PL より 10 dB 以上低いなら、 L_{eq} は BL の変化にほとんど影響されない。ま

た、 L_{10} は BL に一致するかほぼ等しい値となる。

Fig. 5 に示すレベルの時間的変動パターンを呈する騒音を凹型変動騒音と称する。この騒音は凸型変動騒音とは逆に PL の継続時間が長い。全継続時間 20s 中 0.5s の BL が4回発生する。PL から BL 又は BL から PL に到る部分には 100 dB/s の傾斜を設けた。凹型変動騒音の場合、 L_{10} は PL に一致し、 L_{eq} は L_{10} より低くなる。

Fig. 6(a) に示すレベルの時間的変動パターンを呈する騒音を上昇音 (Increasing sound) と称し、Fig. 6 (b) のそれを下降音 (Decreasing sound) と称することにする。これらの騒音では騒音レベルが 20s の継続時間を通じて徐々に上昇又は下降する。上昇音と下降音とでは L_{eq} , L_{10} 等の値は互いに等しいが、両者のうるさが異なる可能性はある。

現実の騒音との関連では、凸型変動騒音は鉄道騒音や交通量の少ない場合の道路交通騒音を、また凹型変動騒音は工場騒音が継続する場合の騒音を模擬している。上昇音と下降音のようなレベル変動は現実の騒音においては稀にしか起こらないと思われる。

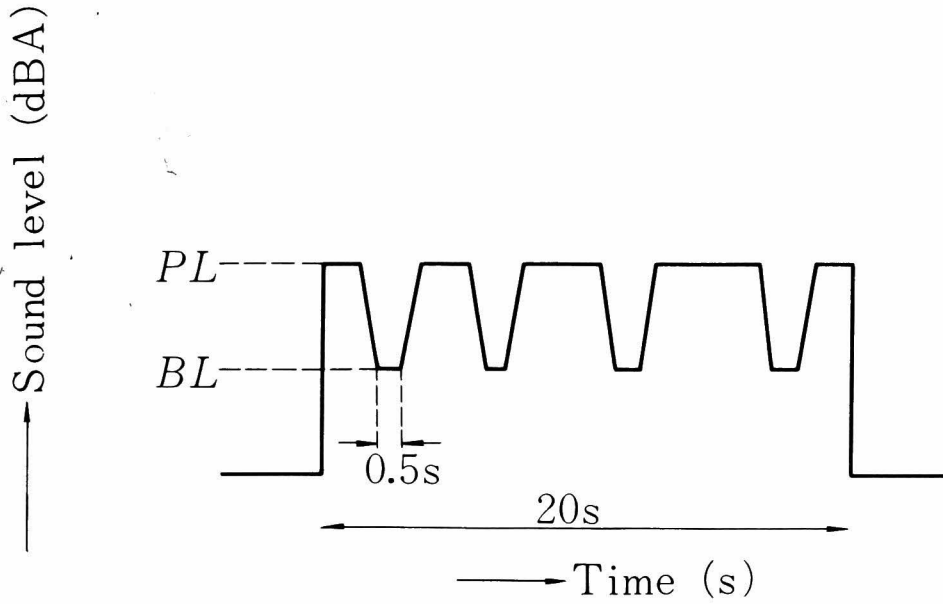


Fig. 5 A time pattern of level fluctuation of concave type sound.

Rising or decaying speed between BL and PL is 100dB/s.

L_{eq} is shown as the following formula,

$$L_{eq} = 10 \log \left[\left\{ 8 \times 10^{\frac{BL}{10}} \cdot \frac{10 \log e}{m} \left(10^{\frac{m \Delta t}{10}} - 1 \right) \right\} + 10^{\frac{PL}{10}} \times t_P + 10^{\frac{BL}{10}} \times t_B \right] / 20,$$

where m is the absolute value of rising or decaying speed between PL and BL, Δt is rise or fall time between PL and BL, t_P is the total duration of PL, and t_B is the total duration of BL.

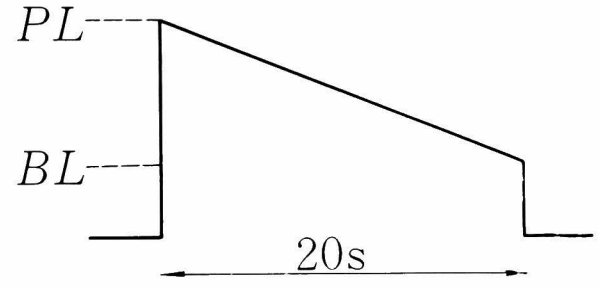
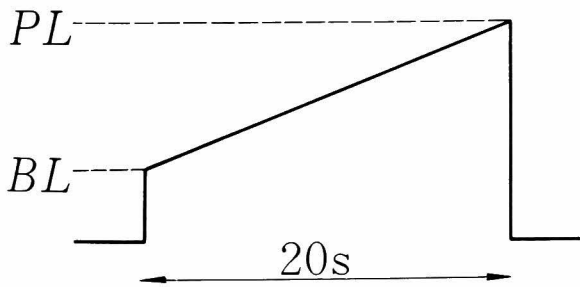


Fig. 6 (a) A time pattern of increasing sound.

Fig. 6 (b) A time pattern of decreasing sound.

L_{eq} of the both sounds is shown as the following formula,

$$L_{eq} = 10 \log \left\{ 10^{\frac{BL}{10}} \cdot \frac{10 \log e}{m} \left(10^{\frac{20m}{10}} - 1 \right) \right\},$$

where m is the absolute value of rising or decaying speed.

Table 2 Some physical characteristics of stimulus sounds used in Experiment 2 and their ESLs.

<i>PL</i> dBA	<i>BL</i> dBA	<i>t_P</i> s	<i>t_B</i> s	<i>Δt</i> s	<i>L_{eq}</i> dBA	Mean ESL and its 95% confidence limits dBA
60*		20.0			60.0	
70*		20.0			70.0	
80*		20.0			80.0	
90*		20.0			90.0	
95	85	1.0	18.6	0.4	86.8	91.2±1.2
95	75	1.0	18.2	0.8	83.3	83.2±0.9
95	65	1.0	17.8	1.2	82.8	78.8±1.4
95	55	1.0	17.4	1.6	82.7	75.9±1.5
95	45	1.0	17.0	2.0	82.7	76.9±2.1
85	75	1.0	18.6	0.4	76.8	76.8±1.3
85	65	1.0	18.2	0.8	73.3	71.4±1.2
85	55	1.0	17.8	1.2	72.8	70.0±1.5
85	45	1.0	17.4	1.6	72.7	61.3±1.9
75	65	1.0	18.6	0.4	66.8	66.8±0.9
75	55	1.0	18.2	0.8	63.3	60.5±1.6
75	45	1.0	17.8	1.2	62.3	53.2±1.1

* steady noise

PL; peak level, *BL*; background level, *t_P*; total duration of *PL*, *t_B*; total duration of *BL*, *Δt*; rise or fall time between *PL* and *BL*. Sound level changes at a rising or decaying speed of 100 dB/s.

Table 3 Some physical characteristics of stimulus sounds used in Experiment 3 and their ESLs.

	<i>PL</i> dBA	<i>BL</i> dBA	<i>t_P</i> s	<i>t_B</i> s	<i>Δt</i> s	<i>L_{eq}</i> dBA	Mean ESL and its 95% confidence limits dBA
Steady	60		20.0			60.0	
	70		20.0			70.0	
	80		20.0			80.0	
	90		20.0			90.0	
Convex	95	35	1.0	16.6	2.4	82.7	75.2±2.6
	85	35	1.0	17.0	2.0	72.7	61.2±1.9
	75	35	1.0	17.4	1.6	62.7	54.1±1.3
	85	50	1.0	17.6	1.4	72.7	67.5±1.2
	75	50	1.0	18.0	1.0	62.9	61.0±1.2
Increasing or Decreasing	65	45	I*		20.0	58.3	65.0±1.3
	65	45	D*		20.0	58.3	58.0±1.5
	75	55	I*		20.0	68.3	74.1±1.0
	75	55	D*		20.0	68.3	66.4±1.1
	85	45	I*		20.0	75.4	81.5±1.4
	85	45	D*		20.0	75.4	70.4±1.3
	95	55	I*		20.0	85.4	90.9±1.5
Concave	95	55	D*		20.0	85.4	82.3±1.4
	95	65		2.0	2.4	94.0	91.4±1.3
	85	65		2.0	1.6	84.2	80.1±0.9
	75	65		2.0	0.8	74.5	73.7±1.1

* I; Increasing sound, D; Decreasing sound

** *t_P*; total duration of *PL*, *t_B*; total duration of *BL*, *Δt*; rise or fall time between *PL* and *BL*.

これらの刺激音を用いた実験は2度に分けて行なった。まず凸型変動騒音のみを用いた実験(実験2)を行ない、次に凸型変動騒音、凹型変動騒音、上昇音、下降音を含めた実験(実験3)を行なった。

Table 2 には実験2に用いた刺激音の物理性状を示した。すなわち *PL* は 95, 85, 75 dBA の3種とし、*BL* は *PL* より 10, 20, 30, …… dB 低い値とした。

Table 2 に示したように、12種の凸型変動騒音に4種の定常音を加えて合計16個の音を刺激音とした。

Table 3 には実験3で用いた刺激音の物理性状を示した。凸型変動騒音は実験2の刺激音を追補するために用いた。凹型変動騒音は *BL* を 65 dB に固定し *PL* を 75, 85, 95 dBA と変えた。上昇音には、45又は55 dBA からそれぞれ65又は75 dBA に到る音と、45又は55 dBA からそれぞれ85又は95 dBA に到る音とを用いた。下降音のレベル変動は上昇音のそれと時間的に対称になるようにした。すなわち、実験3では凸型変動騒音を5個、凹型変動騒音を3個および上昇音ならびに下降音をおのおの4個ずつ用い、これに定常音を4個加えて合計20個の音を刺激音とした。

3.1.2 刺激音の作製

騒音レベル制御装置に入力するプログラムをそれぞれの実験に用いた刺激音に応じて作成した。刺激音の作製に関するその余の事項は2.1.2に記載した通りである。

3.1.3 実験手法

変動騒音も定常音も1個ずつ用いて1つの刺激系列を作った。すなわち実験2では16個の音を、また実験3では20個の音をランダムに配列して1つの刺激系列を作製した。

実験手法に関するその余の事項は2.1.3に記載した通りである。

3.1.4 被検者

2.1.4に記載した通りである。ただし、実験2で用いた被検者30名中、男女各8名は、実験1で用いた被検者とは異なる。また、実験3で用いた被検者30名中、男5名、女7名は実験2で用いた被検者とは異なる。

全被検者を通じた2回の成績の相関係数は、実験2では0.790で、実験3では0.815であった。

3.2 実験結果

2.2で記述したのと同様にして実験データを整理し、定常音の成績から変動音のESLを算出した。定常音の成績で得られた ϕ に対する音の強さのベキ指数は、実験2では0.213であり、実験3では0.258であった。

Fig. 7 では凸型変動騒音のESLを L_{eq} に対してプロットした。図中の実線は $ESL=L_{eq}$ の関係を示す。図からわかるように、*PL*を一定にして*BL*を変化させた場合には、 L_{eq} はほとんど変化しないが、ESLは大きく変化している。すなわち、この場合は騒音のエネルギー

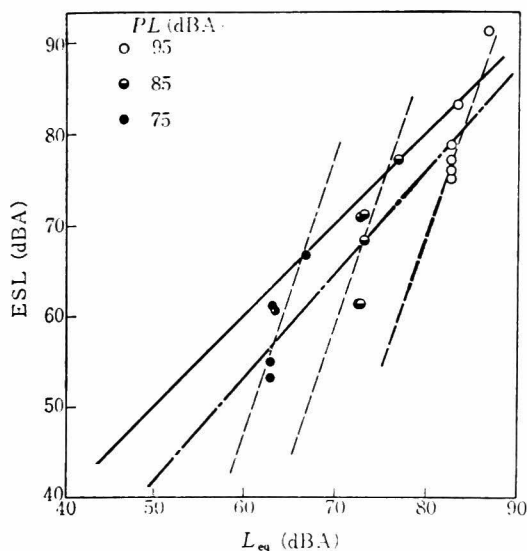


Fig. 7 L_{eq} vs. ESL (Convex type sound).
 — ; $ESL=L_{eq}$, - - - - ; $ESL=1.13L_{eq}-14.2$,
 - · - · - ; $ESL=-1.94PL+3.01L_{eq}+12.5$
 L_{eq} is insensitive to the change of BL , while ESL follows the change of BL to some extent.

ギーが等しくても BL が変わればうるさが異なる。

L_{eq} と PL とを説明変数とする重回帰式は、

$$ESL = -1.94 PL + 3.01 L_{eq} + 12.5 \quad (7)$$

となり、重相関係数は 0.958 であった。図中の破線は式(7)により引いた。これより、 PL が一定の時 ESL は L_{eq} の変化の 3 倍の割で変化していることが知られる。また、 L_{eq} が一定なら PL が低い方が ESL が高く、 L_{eq} が等しい場合には変動幅が小さい方がうるさく感じられることを示している。この傾向は 1 次の自己回帰型変動騒音の場合にも認められた²⁾。

L_{eq} のみを説明変数として回帰直線を求めると、

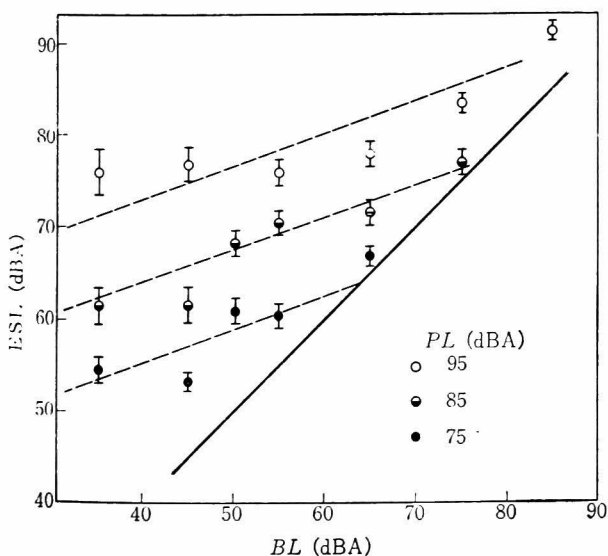


Fig. 8 BL vs. ESL (Convex type sound).
 — ; $ESL=BL$,
 - - - - ; $ESL=0.880PL+0.353BL-25.1$

$$ESL = 1.13 L_{eq} - 14.2 \quad (8)$$

となり、相関係数は 0.913 であった。図中の一点鎖線は式(8)によって引いた。この式からは、近似的には L_{eq} とうるささが対応しているといえる。

Fig. 8 では凸型変動騒音の成績を BL に対してプロットした。図中 ESL の 95% 信頼限界を縦線で示した。図中の実線は $ESL=BL$ の関係を示す。図から、 PL を一定にして BL を変化させた時に ESL が変化する様子がみてとれる。

PL と BL とを説明変数とした重回帰式は、

$$ESL = 0.880 PL + 0.353 BL - 25.1 \quad (9)$$

となり、重相関係数は 0.972 であった。

式(9)から BL を一定として PL をたとえば 10 dB 変化させると ESL は 8.8 dB 変化する。これは凸型変動騒音では BL の部分が係留刺激になって PL の部分が評価されており、その係留効果⁶⁾ が表われたことによるとも解せられる。

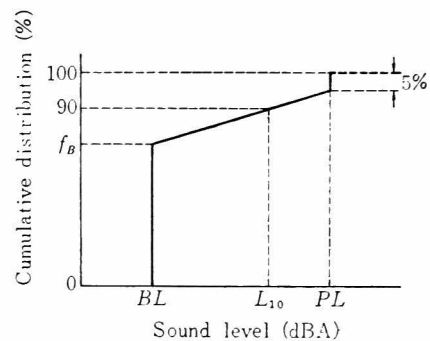


Fig. 9 Cumulative distribution of sound level of convex type sound.

$L_{10}=BL$ when f_B is over 90 (%), and $L_{10}=PL-25$ when f_B is under 90 (%)

次に凸型変動騒音の ESL と L_{10} との関係を論ずる。凸型変動騒音では **Fig. 9** に示すように、20 s の継続時間中に PL が 5% (1 s) を占める。 PL と BL との移行部分には 100 dB/s の傾斜を設けているから、 BL の占める割合 (f_B %) は PL と BL との差によって変わる。 $f_B \geq 90$ (%) すなわち $PL-BL \leq 25$ dB の場合には L_{10} は BL に一致し、 $f_B < 90$ (%) すなわち $PL-BL > 25$ dB の場合には、 L_{10} は $PL-BL$ に無関係となって $L_{10}=PL-25$ となる。

Fig. 10 では L_{10} に対して ESL をプロットした。図中の実線は $ESL=L_{10}$ の関係を示す。 $PL-BL > 25$ dB では L_{10} が変化しないが ESL は変化している。

PL と L_{10} とを説明変数として重回帰式を求めると、

$$ESL = 0.243 PL + 0.843 L_{10} - 5.1 \quad (10)$$

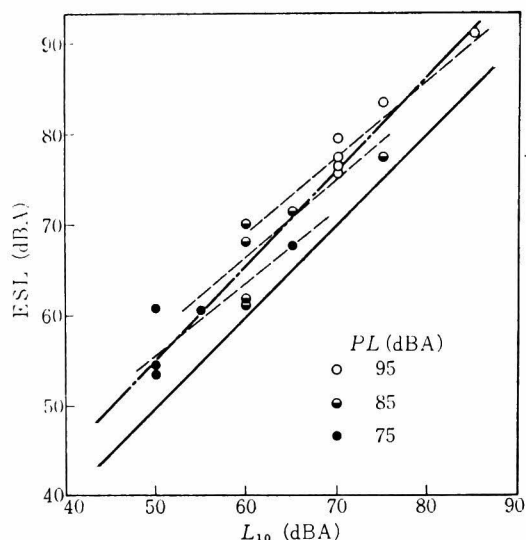


Fig. 10 L_{10} vs. ESL (Convex type sound).
 — ; $ESL = L_{10}$, - - - - ; $ESL = 1.01L_{10} + 15.0$,
 - · - · - ; $ESL = 0.243PL + 0.843L_{10} - 5.1$

となり、相関係数は 0.963 であった。

L_{10} のみを説明変数とした回帰直線は、

$$ESL = 1.01 L_{10} + 15.0 \quad (11)$$

で表わされ、相関係数は 0.957 であった。**Fig. 10** において破線で描いた直線は式(10)の重回帰直線を、また一点鎖線は式(11)の回帰直線を示している。

以上の成績から、凸型変動騒音に関しては、 L_{eq} より L_{10} の方がうるささとの対応がよいといえる。また、説明変数を 2 個とすれば PL と BL とを説明変数とする場合において、 PL と L_{eq} あるいは PL と L_{10} を説明変数とする場合より重相関係数が高かった。

凹型変動騒音の成績を **Fig. 11** および **Fig. 12** に示す。**Fig. 11** では ESL を L_{eq} に対して、また **Fig. 12** では ESL を L_{10} に対してプロットした。この刺激音の場合には

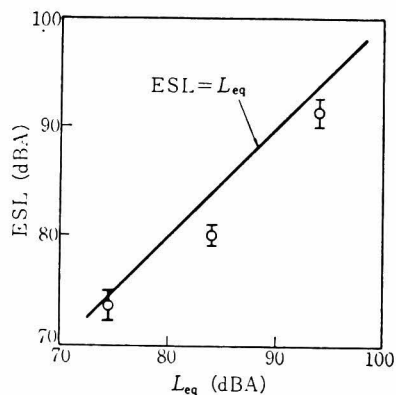


Fig. 11 L_{eq} vs. ESL (Concave type sound).
 Vertical bars show 95 per cent confidence limits of mean ESLs.

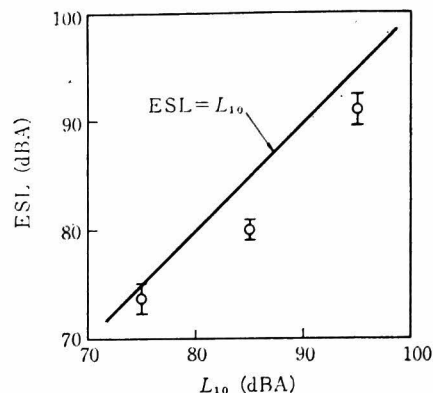


Fig. 12 L_{10} vs. ESL (Concave type sound).
 Vertical bars show 95 per cent confidence limits of mean ESLs.

合には L_{10} は PL に完全に一致する。いずれの図においても図中の実線は $ESL = L_{eq}$ 又は $ESL = L_{10}$ の関係を示している。図から ESL は L_{eq} 又は L_{10} より低い値になっていることが知られ、 L_{eq} 又は L_{10} と ESL との差は大きくなっている。これらの刺激音では BL を一定として PL を変化させているため、 L_{eq} および L_{10} の変化は PL の変化により生じている。また、 L_{eq} 又は L_{10} と ESL との差は、 PL と BL との差に起因すると解せられる。

以上のことから凸型および凹型の変動騒音に関しては、 L_{eq} はレベル変動のパターン変化に対して鈍感であるが、うるさはレベル変動のパターンの変化に応じて変化することが明らかとなった。これらの騒音はレベルの分布形状としては特殊な音ではあるが、この種の騒音

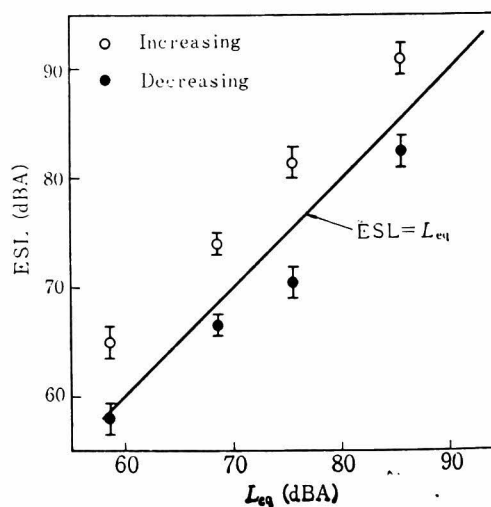


Fig. 13 L_{eq} vs. ESL (Increasing and decreasing sounds).
 Vertical bars show 95 per cent confidence limits of mean ESLs.

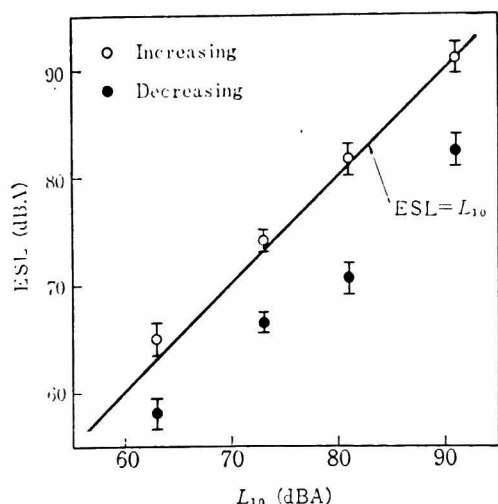


Fig. 14 L_{10} vs. ESL (Increasing and decreasing sounds).
Vertical bars show 95 per cent confidence limits of mean ESLs.

に関しては「等エネルギー仮説」は成立しないことが明らかとなった。

Fig. 13 で上昇音と下降音の ESL を L_{eq} に対してプロットした。図中の直線は $ESL = L_{eq}$ の関係を示す。Fig. 14 では L_{10} に対して ESL をプロットした。図中の直線は $ESL = L_{10}$ の関係を示す。 L_{eq} に関していえば上昇音の ESL は L_{eq} より大きく、下降音の ESL が L_{eq} に近い (Fig. 13)。 L_{10} については上昇音の L_{10} が ESL にほぼ等しく、下降音の ESL は L_{10} より低い

(Fig. 14)。

上昇音の ESL は下降音のそれに比べてレベルの変化速度が 1 dB/s の時は 7.4 dB, 2 dB/s の時は 9.9 dB 高くなっており、差の平均は 8.6 dB であった。上昇音の方が下降音よりうるさく感じられるという成績は Rosinger et al.⁷⁾ のそれとも符合する。下降音の L_{eq} が定常音のレベルに等しい場合、Rosinger et al. は下降音の方が定常音よりうるさく感じられるという成績を得ているが、今回の実験では定常音の方がうるさく感じられている (Fig. 13)。

上昇音が下降音よりうるさく感じられるのはなぜかという問題がある。その理由の一つに上昇音は音源が接近しつつあるという印象を与えることが考えられる。今仮にこの効果を接近効果と呼ぶことにする。実験終了後の被検者の報告にもこの効果を指摘するものがあつた。しかし、実験 1 で用いた刺激音も前半の 10 s はレベルが上昇する音であり、接近効果を有しているはずであるが、うるささの判定にその効果は認められないので、接近効果のみによってデータを説明することは適当ではないと思われる。今一つの理由として、上昇音は終了時にレベルが高いということが考えられる。この実験で用いている ESL が一種の順応水準⁸⁾ であるとみなせば、刺激音の終了時にレベルが高いということは順応水準が高くなった状態で被検者が評価していることになる。この説明は一応妥当であると思われるが、被検者の反応時間、係留効果等とも関連する問題であり、将来の検討課

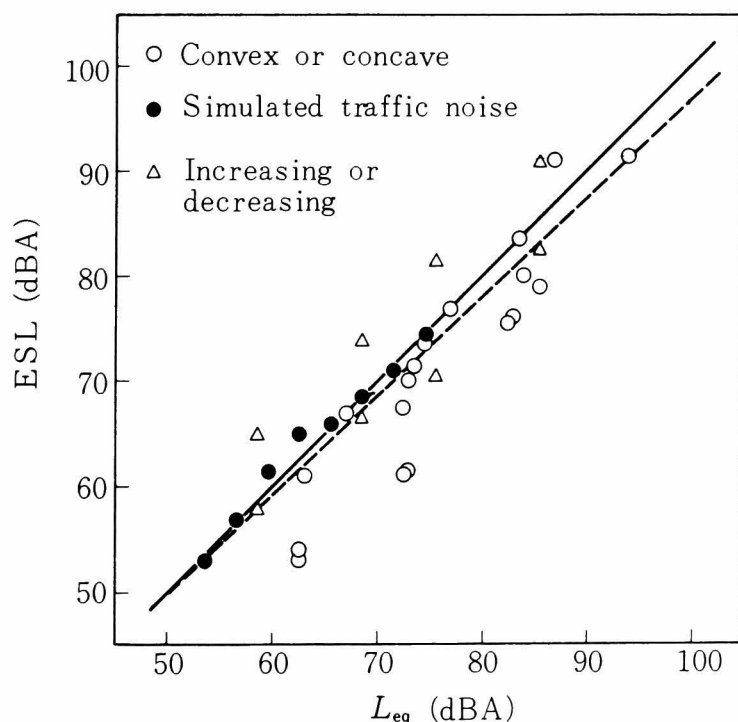


Fig. 15 L_{eq} vs. ESL (Total).
——; $ESL = L_{eq}$, ----; $ESL = 0.932L_{eq} + 3.2$

題としておきたい。あるいは何らかの記憶関数を導入して時間的な重みづけを行なうことも考えられるが、今回の実験成績からは記憶関数を決定するに十分な資料が得られていない。

実験成績についていえば、今回用いた実験条件による成績に関する限り、レベル変動の順序の影響を無視することはできなかった。 L_{eq} , L_{10} 等の評価尺度はこの時間的な順序を無視しているから、これらの尺度では上昇音と下降音のうるさを評価することはできない。また、当然「等エネルギー仮説」も成立しない。

実験 1, 2, 3 の成績をこみにして、 L_{eq} に対してプロットしたのが Fig. 15 である。図中の実線は $ESL = L_{eq}$ の関係を示し、点線は L_{eq} に対する ESL の回帰直線を示している。この回帰直線は、

$$ESL = 0.932 L_{eq} + 3.2 \quad (12)$$

で表わされ、相関係数は 0.898 であった。実験 2, 3 で用いた刺激音は L_{eq} の適合し難い刺激音であり、「等エネルギー仮説」がそれらの刺激音に関する実験成績から否定されたにもかかわらず、 L_{eq} とうるささとの“近似的な”対応関係が Fig. 15 および式(12)から認められる。

4. おわりに

L_{eq} , L_{10} , $\bar{L} + \sigma$ と騒音のうるささとの対応を吟味するため、1) 等間隔モデルに基づく模擬交通騒音、2) 騒音レベルが主としてピークレベルとバックグラウンドレベルのみとなる騒音および、3) 騒音レベルが連続的に上昇又は下降する騒音を用いた聴取実験を行なった結果、以下のことが明らかとなった。

1) の場合は L_{10} , $\bar{L} + \sigma$ はうるささとの対応が悪く、 L_{eq} が最もよくうるささに対応した。

2) の場合は、 L_{10} が L_{eq} に比べてうるささとの対応がよかった。またこの場合、ピークレベルを一定にしてバックグラウンドレベルを変化させても、 L_{eq} に大きな変化は生じないが、うるさは変化した。

3) の場合は、レベルが上昇する音の方が下降する音よりうるさく判定され、両者の ESL で 7~11 dBA の差が認められた。騒音レベルが上昇する音も下降する者も L_{eq} は等しいから、 L_{eq} によってこの種の音の評価はできない。騒音レベルが上昇する音の場合は、 L_{10} がうるささとよく対応した。

以上の結果から、 L_{eq} , L_{10} , $\bar{L} + \sigma$ のいずれの評価尺度もうるささとの対応がつかない場合のあることが明らかである。また、騒音のエネルギーが等しいからといってうるさが等しいとは限らない。すなわち「等エネルギー仮説」は否定された。しかし、 L_{eq} は近似的にはうるささとの対応が比較的良好な評価尺度であるといえる。

- 1) 平松幸三, 横江齊, 高木興一, 山本剛夫: 騒音レベルの変動幅および変動速度とうるささとの関係 — 鋸歯状変動騒音による実験 —, 日本公衛誌 25(3) (1978) p. 253
- 2) 平松幸三, 山中浩一, 高木興一, 山本剛夫: 変動騒音のうるささ (騒音レベルの標準偏差と変動周波数の影響) 音響学会誌 34(7) (1978) p. 376
- 3) 庄司光, 山本剛夫, 中村隆一: 街頭騒音とくに交通騒音に関する研究 第 1 報 車種別騒音の特性と交通騒音の距離による減衰, 音響学会誌 19(3) (1963) p. 97
- 4) 高木興一: 「自動車による騒音・振動の特性と環境問題 (騒音の部)」土木学会関西支部講習会テキスト (1976)
- 5) 難波精一郎, 桑野園子, 加藤徹: L_{eq} , L_{α} と大きさの関係について, 音響学会誌 34(5) (1978) p. 301
- 6) 柿崎祐一: 知覚判断, 培風館, (1974) p. 34
- 7) G. Rosinger, C.W. Nixon, and H.E. von Gierke: Quantification of the noisiness of 'Approaching' and 'Receding' sounds. J. Acoust. Soc. Am., 48(4) (1970) p. 843
- 8) H. Helson: Adaptation Level Theory, Harper & Row, N.Y. (1964)

第7章 心理量の加算に基づく 変動騒音の評価法

第7章 心理量の加算に基づく 変動騒音の評価法

1. はじめに

第5章で変動騒音とうるささが等価な定常騒音のレベルとして、実効騒音レベル (Effective Sound Level; ESL) を定義した。レベルの変動速度、変動周波数、標準偏差を種々に変化させた変動騒音の ESL を測定した実験結果¹⁾²⁾によれば、TNI (Traffic Noise Index), NPL (Noise Pollution Level), L_{50} (レベルの中央値), \bar{L} (レベルの平均値) は ESL との対応が悪く, L_{eq} (等価騒音レベル), $\bar{L} + \sigma$ (σ : レベルの標準偏差), L_{10} が ESL との対応が優れており, なかんずく L_{eq} は ESL を最もよく予測する評価尺度と認められた。しかし, 一方「エネルギー仮説」は成立しないことも明らかとなった³⁾。

現在までに提唱されてきた, 変動要因を考慮した評価尺度 (TNI, NPL 等) は, ごく限られた変動騒音 (交通騒音および航空機騒音) に対する野外調査の結果に基づいて構成されたものであり, その適用範囲は極めて狭く, かつ心理量に対する加算性を基礎にして導出されたものではなく, 論理的にも説得力に乏しい憾みがある。

しかしもし時間的に変化する心理量の加算方法が発見されたなら, 変動騒音の評価の問題は大部分が解決されるであろう。この点にかんがみ, 本章においては心理量の加算性について吟味し, 加算方法の一つの試みとして, 継続時間の効果を考慮した心理量の加算方法を提案する。更に変動騒音のレベルの分布から ESL を計算する方法を導出し, ESL の計算値と実測値との比較から提案した加算方法の妥当性を検討する。最後に ESL の意義についても言及する。

2. 変動騒音の心理量の加算に基づく ESL の算出方法

2.1 心理量の加算性と ESL

S.S. Stevens⁴⁾によれば, 一般に心理量 (今の場合ラウドネス) ψ と音圧 p (μPa) との間には,

$$\psi = k(p/p_0)^{2\alpha} \quad (k, \alpha \text{ は定数}, p_0 = 20 \mu\text{Pa}) \quad (1)$$

という関係が成立する。 $k=1$ としても一般性は失わないので以後 $k=1$ とする。今, 騒音のレベルの時間的変動が急でなく, 心理量はその変動に十分追従できて, かつ対比効果⁵⁾, 文脈効果⁶⁾ 等が無視できて, 式(1)の関係が任意の時刻 t において成立すると仮定する。この時騒音レベルが時間的に変動すれば, 各時刻における ψ も時々刻々に変化する。一方継続時間 T 内でレベルが時間的に変化する騒音の全体の印象として総合的な心理量 Ψ が得られる。もし, ψ が単純に加算できるなら, 総合的な心理量 Ψ は時々刻々の心理量 $\psi(t)$ の積分として得られ, 式(2)が成立するはずである。

$$\Psi = \int_0^T \psi(t) dt \quad (2)$$

今, 定常音 ($p = \text{const.}$) の場合を考えると, $\psi(t) = \text{const.}$ であるから, この時の ψ を ψ_s とすれば,

$$\Psi = \int_0^T \psi_s dt = \psi_s \cdot T \quad (3)$$

この時の p を p_s とすれば式(1)および(3)から,

$$\Psi = (p_s/p_0)^{2\alpha} \cdot T \quad (4)$$

を得る。

しかし, 騒音の継続時間がうるささに及ぼす効果を測定した成績⁶⁾によれば

$$\Psi = (p_s/p_0)^{2\alpha} \cdot T^\beta \quad (5)$$

となり, $\alpha = 0.33$ とすれば $\beta = 0.37$ である。

このことから, 式(2)によっては Ψ が予測できないことがわかる。また, 変動騒音に式(2)を適用しても実験成績と適合しない。難波ら⁷⁾もレベル変動音に対しては ψ の加算性が成立しないと報告している。すなわち, 単純には ψ を加算することができないといえる。

しかし, 逆にいえば, 継続時間の効果があるにもかかわらず, 式(2)で心理量の積分値を計算することに矛盾があるのであって, 継続時間の効果をも考慮した取り扱いが必要であるとも考えられる。

ここで一つの仮定をおこう。今, 継続時間の効果の重みづけをした心理量が加算されるとする。すなわち, 騒音レベルの変動に伴って, ψ が Fig. 1 に示すように時間的に変化する時, 継続時間を T として, ψ_i と $\psi_i + d\psi$ との間に ψ が存在する時間 T_i は, $T_i = dt_1 + dt_2 + \dots + dt_n$ ($i=1, 2, \dots, K$) となる。この T_i を ψ_i が継続する時間とみなし, 継続時間の重みづけをした心理量 $\psi_i \times T_i^\beta$ が i について加算されると仮定する。

ここで, T_i^β の総和は T^β とは異なるので,

$$A \times \sum_{i=1}^K T_i^\beta = T^\beta \quad (6)$$

となるように, 定数 A を決定しておく。この時, 継続時間の重みづけをした心理量の積分値は

$$\Psi = A \sum_{i=1}^K \psi_i \cdot T_i^\beta = T^\beta \sum_{i=1}^K \psi_i \cdot T_i^\beta / \sum_{i=1}^K T_i^\beta \quad (7)$$

となる。

T_i/T は ψ が ψ_i と $\psi_i + d\psi$ の間に存在する確率と考えられるから式(7)を ψ の確率密度関数 $p(\psi)$ を用いて書き換えると,

$$\Psi = T^\beta \int_0^\infty \psi p(\psi)^\beta d\psi / \int_0^\infty p(\psi)^\beta d\psi \quad (8)$$

となる。ここで,

$$q(\psi) = p(\psi)^\beta / \int_0^\infty p(\psi)^\beta d\psi \quad (9)$$

とおくと, $q(\psi)$ は継続時間の効果を考慮した ψ の確率密度関数と考えられ, ψ の平均値 $E[\psi]$ は,

$$E[\psi] = \int_0^\infty \psi q(\psi) d\psi \quad (10)$$

となるから式(8)は,

$$\Psi = T^\beta \int_0^\infty \phi q(\phi) d\phi = T^\beta \times E[\phi] \quad (11)$$

と表わされる。

この $E[\phi]$ は変動騒音と心理量が等価な定常音の心理量（いずれも継続時間は等しい）とみなし得る。

騒音レベル L_A (dB A) と A 特性の重みづけをした音圧 p_A (μ Pa) には、

$$L_A \triangleq 10 \log(p_A/p_0)^2 \triangleq 10 \log \sum_i w_i (p_i/p_0)^2 \quad (12)$$

という関係がある。ただし、 w_i は i 番目の $1/3$ オクターブの中心周波数における重みである。よって、式(5)、(11)、および(12)より、変動騒音の実効騒音レベル (ESL) は、

$$\begin{aligned} \text{ESL} &\triangleq 10 \log(p_{As}/p_0)^2 = 10 \log(\Psi/T^\beta)^{1/\alpha} \\ &= \frac{10}{\alpha} \log E[\phi] \end{aligned} \quad (13)$$

として求めることができる。

2.2 レベルの確率密度関数と ESL

騒音レベル L_A の確率密度関数を $f(L_A)$ とすると、

$$L_A = \frac{10}{\alpha} \log \phi = \frac{10}{\alpha \ln 10} \ln \phi \quad (14)$$

であるから、

$$\frac{dL_A}{d\phi} = \frac{10}{\alpha \ln 10} \cdot \frac{1}{\phi} \quad (15)$$

よって、

$$\begin{aligned} p(\phi) &= \frac{dL_A}{d\phi} \cdot f(L_A) = \frac{10}{\alpha \ln 10} \cdot \frac{1}{\phi} f(L_A) \\ &= \frac{10}{\alpha \ln 10} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \ln 10}{10} L_A\right) f(L_A) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty p(\phi)^\beta d\phi \\ &= \int_{-\infty}^\infty \left\{ \frac{10}{\alpha \ln 10} \exp\left(-\frac{\alpha \ln 10}{10} L_A\right) \cdot f(L_A) \right\}^\beta \\ &\quad \times \left(\frac{10}{\alpha \ln 10} \right)^{-1} \cdot \exp\left(\frac{\alpha \ln 10}{10} L_A\right) dL_A \\ &= \left(\frac{10}{\alpha \ln 10} \right)^{\beta-1} \int_{-\infty}^\infty \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (1-\beta)}{10} L_A \right\} \\ &\quad \cdot f(L_A)^\beta dL_A \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} &\int_0^\infty \phi p(\phi)^\beta d\phi \\ &= \left(\frac{\alpha \ln 10}{10} \right)^{1-\beta} \int_{-\infty}^\infty \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (2-\beta)}{10} L_A \right\} \\ &\quad \cdot f(L_A)^\beta dL_A \end{aligned} \quad (18)$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} E[\phi] &= \frac{\int_{-\infty}^\infty \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (2-\beta)}{10} L_A \right\} f(L_A)^\beta dL_A}{\int_{-\infty}^\infty \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (1-\beta)}{10} L_A \right\} f(L_A)^\beta dL_A} \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)および(13)に従って ESL を解析的に算出することは一般には容易ではなく、数値計算によらねばならないが、ここでレベルが一様分布する場合と、正規分布する場合とについて検討を加えておく。

騒音レベルが一様分布する場合（たとえば鋸歯状変動騒音）には、レベルの確率密度関数 $f(L_A)$ は、

$$f(L_A) = 1/(b-a) \quad (20)$$

ここに a, b は定数で、 $b \geq L_A \geq a$ 。ゆえに $E[\phi]$ は、

$$\begin{aligned} E[\phi] &= \frac{\int_a^b \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (2-\beta)}{10} L_A \right\} \cdot \frac{1}{(b-a)^\beta} dL_A}{\int_a^b \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (1-\beta)}{10} L_A \right\} \cdot \frac{1}{(b-a)^\beta} dL_A} \end{aligned}$$

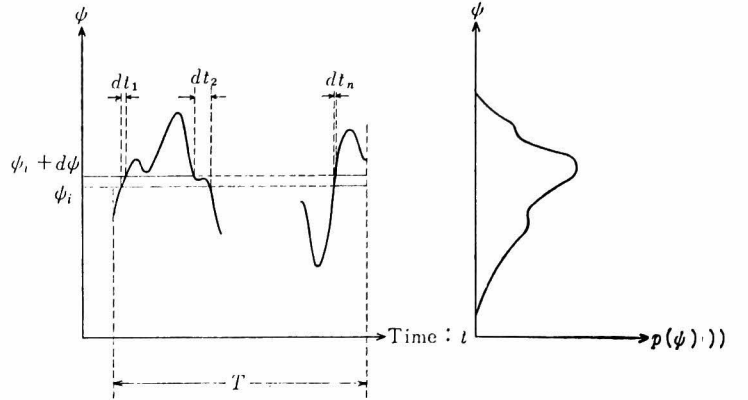


Fig. 1 A schema of temporal fluctuation of annoyance (ϕ). T ; duration of sound, $p(\phi)$; probability density function of ϕ .

$$\begin{aligned} &= \frac{\int_a^b \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (2-\beta)}{10} L_A \right\} dL_A}{\int_a^b \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (1-\beta)}{10} L_A \right\} dL_A} \\ &= \frac{(1-\beta) [\exp\{(2-\beta)\alpha \ln 10 \cdot b/10\} - \exp\{(2-\beta)\alpha \ln 10 \cdot a/10\}]}{(2-\beta) [\exp\{(1-\beta)\alpha \ln 10 \cdot b/10\} - \exp\{(1-\beta)\alpha \ln 10 \cdot a/10\}]} \end{aligned} \quad (21)$$

となる。

また、レベルが正規分布する場合（たとえば、1次および2次の自己回帰型変動騒音）にはレベルの平均値 \bar{L}_A 、分散 σ^2 とすると、

$$f(L_A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{ -(L_A - \bar{L}_A)^2 / 2\sigma^2 \right\} \quad (22)$$

$\bar{L}_A = 0$ としても一般性が失われないから $\bar{L}_A = 0$ とすれば、

$$f(L_A)^\beta = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^\beta \exp(-\beta L_A^2 / 2\sigma^2) \quad (23)$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} E[\phi] &= \frac{\int_{-\infty}^\infty \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (2-\beta)}{10} L_A \right\} \cdot \exp\{-\beta L_A^2 / 2\sigma^2\} dL_A}{\int_{-\infty}^\infty \exp\left\{ \frac{\alpha \ln 10 \cdot (1-\beta)}{10} L_A \right\} \cdot \exp\{-\beta L_A^2 / 2\sigma^2\} dL_A} \end{aligned} \quad (24)$$

今、

$$g^2 = \beta / 2\sigma^2 \quad (25)$$

$$h_1 = (1-\beta)\alpha \ln 10 / 10 \quad (26)$$

$$h_2 = (2 - \beta)\alpha \ln 10/10 \quad (27)$$

とおくと、式(24)の右辺の分母と分子は、

$$\begin{aligned} \text{分母} &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{h_1 L_A - g^2 L_A^2\} dL_A \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-g^2 \left(L_A - \frac{h_1}{2g^2}\right)^2 + \frac{h_1^2}{4g^2}\right\} dL_A \\ &= \exp(h_1^2/4g^2) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-g^2 \left(L_A - \frac{h_1}{2g^2}\right)^2\right\} dL_A \\ &= \exp(h_1^2/4g^2) \times \frac{\sqrt{\pi}}{g} \quad (28) \end{aligned}$$

$$\text{分子} = \exp(h_2^2/4g^2) \times \frac{\sqrt{\pi}}{g} \quad (29)$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} E[\psi] &= \exp\{(h_2^2 - h_1^2)/4g^2\} \\ &= \exp\left\{\frac{\sigma^2}{2\beta} \left(\frac{\alpha \ln 10}{10}\right)^2 (3 - 2\beta)\right\} \quad (30) \end{aligned}$$

$$ESL = \frac{10}{\alpha} \log E[\psi] = \frac{\ln 10}{20} \sigma^2 \times \frac{\alpha(3 - 2\beta)}{\beta} \quad (31)$$

この場合 L_{eq} は、

$$L_{eq} = \frac{\ln 10}{20} \sigma^2$$

であるから、

$$ESL = L_{eq} \times \frac{\alpha}{\beta} (3 - 2\beta) \quad (32)$$

$\alpha = 0.33$, $\beta = 0.37$ とすれば $ESL = 2.0 \times L_{eq}$ となり、 σ が大きくなるにつれて両者の差は著しくなる。たとえば、 $\sigma = 10$ dB では $ESL = 23.0$ dB, $L_{eq} = 11.5$ dB, また $\sigma = 15$ dB では $ESL = 51.8$ dB, $L_{eq} = 25.9$ dB である。しかし、現実の騒音の $f(L_A)$ に基づいて ESL を計算すると L_{eq} に近い値が得られる。上記の試算で得られた L_{eq} と ESL とが大きく異なる理由に、確率密度関数を定義する L_A の区間を無限大としていることが考えられる。実際、正規分布の打ち切り分布を考え、 $-2\sigma \leq L_A \leq 2\sigma$ で $f(L_A)$ を定義すれば、 $\sigma = 10$ dB の場合には $ESL = 8.4$ dB, $L_{eq} = 7.4$ dB, また $\sigma = 15$ dB の場合には $ESL = 16.5$ dB, $L_{eq} = 14.8$ dB である。したがって ESL を算出する場合には騒音のレベルの確率密度関数はレベルの有限区間内で定義する必要がある。

3. ESL の計算値と実測値との比較

前節で述べた ESL の計算方法の妥当性は実験成績との比較によって吟味しなければならない。本節では、 ESL の計算値（以下 ESL_{cal} と称す）と、筆者が行なった実験¹⁾²⁾³⁾で得られた ESL の測定値（以下 ESL_{ob} と称す）とを比較する。

ESL_{cal} を計算する場合に、まず α , β の値が問題となる。 ESL_{ob} を得た実験においては変動騒音と定常音とを併せて一連の刺激系列を作製しているので、定常音の成績からその実験場面における α の値が求められている。 α の値は刺激音、被検者等の実験条件によって若干

変るので、 ESL の計算値を実測値と比較する場合には、両者の差を拡大する可能性のある要因（今の場合個人差）を除去するために各実験場面で得られた α を用いるのが合理的である。一方、 ESL_{cal} を評価尺度として用いる場合には、 α の値はあらかじめ定めておかねばならない。

α の値としては、S.S. Stevens⁴⁾ は 0.33 が最頻値であるという。 β の値としては、それぞれの実験場面では得られていないが、定常音の継続時間がうるささに及ぼす実験成績⁶⁾では、 β は α の約 1.13 倍であり、 $\alpha = 0.33$ とすると $\beta = 0.37$ という関係が得られている。

以上の点を考慮して、今回は次の 3 種の α , β を用いた。① α の値をおおのの実験で得られた値とし、 $\beta = 1.13\alpha$ とする。この ESL_{cal} を ESL_{cal1} とする。② α の値をおおのの実験で得られた値とし、 $\beta = 0.37$ とする。この ESL_{cal} を ESL_{cal2} とする。③ $\alpha = 0.33$, $\beta = 0.37$ とする。この ESL_{cal} を ESL_{cal3} とする。

これまで筆者らが行なった実験で用いた 9 種類の刺激音の刺激条件は大略次の通りである。鋸歯状変動騒音¹⁾（継続時間 12s, 平均レベル 70 dBA 又は $L_{eq} = 70 \sim 85$ dBA, レベルの変動速度 20~200 dB/s, レベルの変動幅 6~40 dB）、正弦波状変動騒音²⁾（継続時間 50s, 平均レベル 70~86 dBA, レベルの変動周波数 0.1~1.0 Hz, レベルの変動幅 5~25 dB）、1 次の自己回帰型変動騒音²⁾（継続時間 50s, 平均レベル 70~85 dBA, レベルの標準偏差 5~15 dB）、2 次の自己回帰型変動騒音²⁾（継続時間 50s, 平均レベル 70 dBA, 変動周波数 0.1~1.0 Hz, レベルの標準偏差 5~15 dB）、等間隔モデルに基づく模擬交通騒音³⁾（継続時間 20s, パワーレベル 93.4 dBA, 車速 18 km/h, 車頭間隔 100 m として車線からの距離 0.2~25.6 m）、凸型変動騒音³⁾（継続時間 20s, そのうちピークレベルが 1s 発生。ピークレベル 75~95 dBA, バックグラウンドレベル 35~85 dBA）、凹型変動騒音³⁾（継続時間 20s, そのうちバックグラウンドレベルが 2s 発生。ピークレベル 75~95 dBA, バックグラウンドレベル 65 dBA）、上昇音³⁾（継続時間 20s, 45 又は 55 dBA から 65~95 dBA までレベルが上昇）、下降音（上昇音の逆のレベル変動）。

鋸歯状変動騒音¹⁾, 正弦波状変動騒音²⁾, 1 次および 2 次の自己回帰型変動騒音²⁾ においては、 ESL_{cal} の各値と L_{eq} との差は高々 2 dB 程度であった。これらの騒音では ESL_{ob} は L_{eq} によく対応しているから、後述するように ESL_{ob} も ESL_{cal} によく対応する。

上記の騒音においては、平均レベルに関して対称にレベルが分布するが、等間隔モデルに基づく模擬交通騒音³⁾, 凸型および凹型変動騒音³⁾ ではレベルの分布が歪んでいる。このうち等間隔モデルに基づく模擬交通騒音においては L_{eq} と ESL_{ob} がよく対応し、他の 2 種の

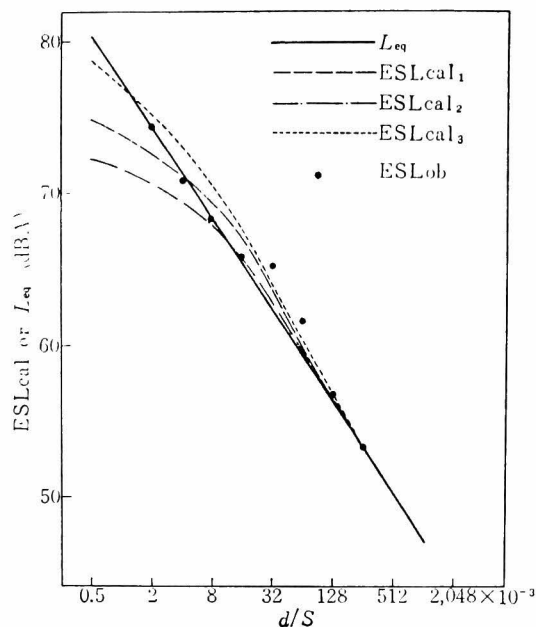


Fig. 2 Changes in $ESLcal_1$, $ESLcal_2$, $ESLcal_3$, and L_{eq} with d/S (Traffic noise simulated on the basis of equally spaced vehicles model).

d ; distance, S ; spacing.

Values of α and β determine the kinds of $ESLcal$.

$ESLcal_1$; α =the values obtained in the experiments, $\beta=1.13\alpha$,

$ESLcal_2$; α =the values obtained in the experiments, $\beta=0.37$,

$ESLcal_3$; $\alpha=0.33$, $\beta=0.37$.

騒音では L_{eq} と $ESlob$ との対応がよくないことが知られている³⁾。

Fig. 2 は等間隔モデルに基づく模擬騒音の L_{eq} および $ESLcal$ が d/S によってどう変化するかを示した図である。ただし、 d は車線から受音点までの距離、 S は車頭間隔である。図中に $ESlob$ をプロットした。図からわかるように、 α 、 β の値にもよるが、 $ESLcal$ は d/S の大きい時は L_{eq} に一致し、 d/S が $4 \sim 64 \times 10^{-3}$ の範囲で L_{eq} より大きくなり、 d/S が 2×10^{-3} より小さい範囲では L_{eq} より小さくなりかつ d/S が小さくなるにつれて L_{eq} から遠ざかる。この実験の成績では d/S が 32×10^{-3} および 64×10^{-3} の場合に $ESlob$ が L_{eq} より大きくなっている。この事実のみに基づいて $ESLcal_1$ や $ESLcal_3$ の妥当性を主張することには無理があるが、 $ESLcal$ が全般に $ESlob$ とよく対応していることは認められる。また、 $ESLcal$ と L_{eq} のいずれが優れているかを論ずるためには実験精度をあげるとともに、より小さい d/S の場合の実験成績が必要である。

凸型および凹型の変動騒音の $ESLcal$ と L_{eq} はピークレベル (PL) とバックグラウンドレベル (BL) との差によって相対的な値が定まる。**Fig. 3** では $PL-BL$ を横軸にとり、 $ESlob$ 、 $ESLcal_1$ 、 $ESLcal_2$ 、 $ESLcal_3$ および L_{eq} と BL との差を縦軸にとって各値を示した。た

だし、たとえば $PL-BL$ が 10 dB である刺激音は PL が 75, 85, 95 dBA の 3 種あり、同じ $PL-BL$ に対して $ESlob-BL$ が 3 種得られている。このような $PL-BL$ ($=10, 20, 30, 40, 50$ dB) に対する $ESlob-BL$ はその平均値を用いた。

凸型変動騒音において L_{eq} は $PL-BL > 20$ dB ではほぼ PL に比例して増大するが、 $ESLcal$ は $PL-BL > 40$ dB で同様な傾向を呈するに到る。これに対し、 $ESlob$ は $ESLcal$ 特にここで $ESLcal_2$ とよい一致が認められる。

凹型変動騒音では L_{eq} はほぼ PL に等しいが $ESlob$ は L_{eq} より低い値を示しており、 $ESLcal$ に近い。

凸型および凹型の変動騒音の $ESlob$ を **Fig. 4** では $ESLcal_1$ に対して、また **Fig. 5** では L_{eq} に対してプロットした。図中の実線は **Fig. 4** では $ESlob=ESLcal_1$ 又は $ESlob=ESLcal_3$ 、**Fig. 5** では $ESlob=L_{eq}$ の関係を示し、点線はそれぞれ $ESlob$ の $ESLcal_1$ 、 $ESLcal_3$ および L_{eq} に対する回帰直線を示している。また、**Fig. 5** では、各ピークレベルにおいて、 L_{eq} と $ESlob$ との関係を示す曲線を示した。

Fig. 3 および **Fig. 4** から、凸型および凹型の変動騒音を通じて、 $ESLcal$ と $ESlob$ との対応のよいことが認められる。 PL を一定にして、レベル変動の型を変化させると $ESlob$ の変化は L_{eq} に対して非線型となるが (**Fig. 5**)、 $ESLcal_1$ 、 $ESLcal_3$ に対してはほぼ線型である (**Fig. 4**)。このことから、 $ESLcal$ は L_{eq} よりうるささの予測精度が高いといえる。

上昇音および下降音について $ESlob$ と $ESLcal_1$ とを比較したのが **Fig. 6** である。図では横軸に $ESLcal_1$ をとり、縦軸に $ESlob$ をとってプロットしてある。図中の直線は $ESlob=ESLcal_1$ の関係を示す。 $ESLcal_2$ および $ESLcal_3$ についても同様な図が得られる。

図から、下降音の $ESlob$ は $ESLcal_1$ によく対応していることが知られる。しかし、上昇音の $ESlob$ は下降音のそれに比べて約 8.6 dB 大きい。上昇音と下降音とは時間的に対称であって、レベルの分布はいずれも一様分布であるからピークレベル (PL) とバックグラウンドレベル (BL) とで $ESLcal$ は決定される。すなわち、 $ESLcal$ が等しくても $ESlob$ が大きく異なる場合があることになる。記憶関数等の時間的重みづけを行なえば、この問題はある程度解決し得ると思われるが、その定量化については将来の検討にまつ。

Table. 1 に鋸歯状変動騒音 (Serrate noise)、正弦波状変動騒音 (Sinusoidal noise)、1 次および 2 次の自己回帰型変動騒音 (Normally distributed noise)、等間隔モデルに基づく模擬交通騒音 (Traffic noise simulated on the basis of equally spaced vehicles model)、凸型および凹型変動騒音 (Convex and concave type sound) のおのおのと更にそれらに上昇音 (Increasing sound)

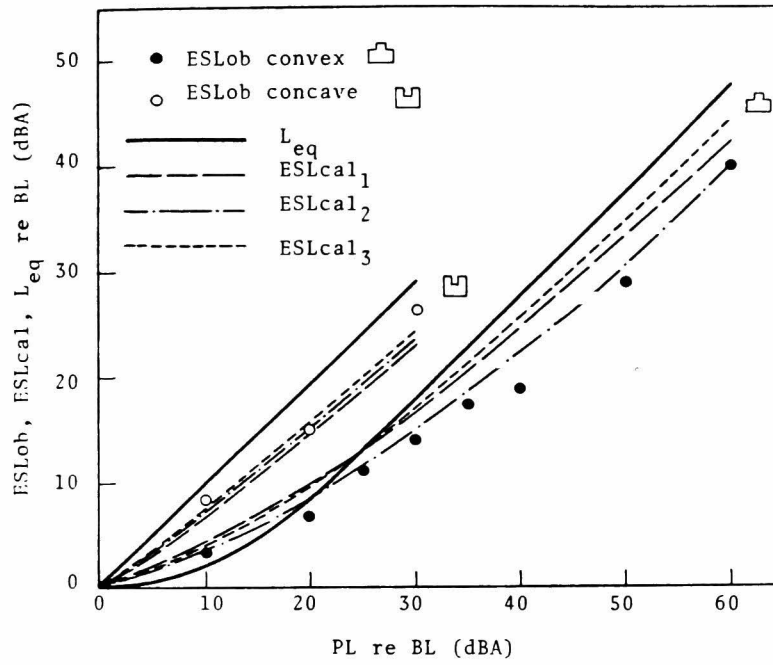


Fig. 3 Comparison of ESLcal and L_{eq} with ESlob (concave and convex type sound).

PL; peak level, BL; background level.

Values are shown as the ones relative to BL.

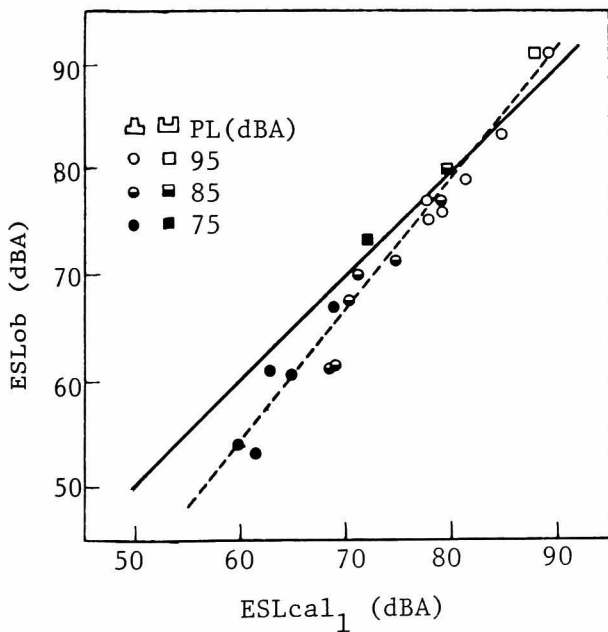


Fig. 4(a) ESlob vs. $ESLcal_1$.

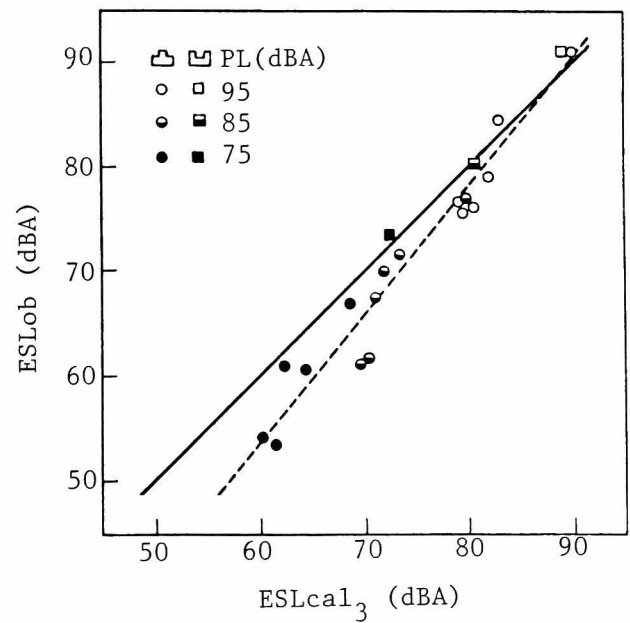


Fig. 4(b) ESlob vs. $ESLcal_3$.

(Convex and concave type sound)

The solid line indicates the relation of $ESlob = ESLcal$, and the dashed line is the regression line of ESlob on ESLcal. ESlob is in linear proportion to ESLcal. Similar figure is obtained for ESlob vs. $ESLcal_2$.

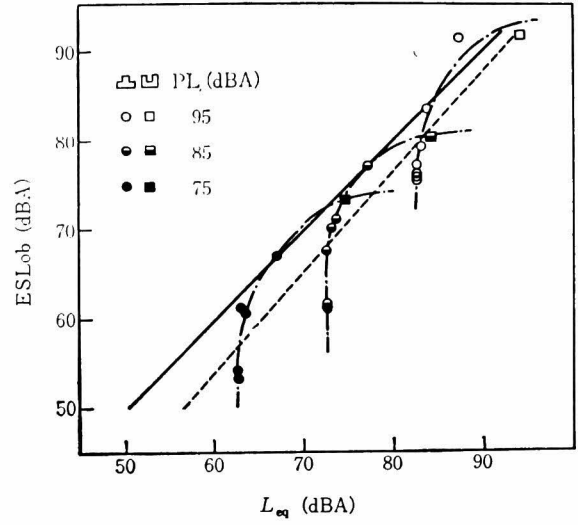


Fig. 5 ESlob vs. L_{eq} (Convex and concave type sound).
The solid line indicates $ESlob = L_{eq}$, and the dashed line is the regression line to L_{eq} . The chain curves show that ESlob is not in linear proportion to L_{eq} when PL is constant.

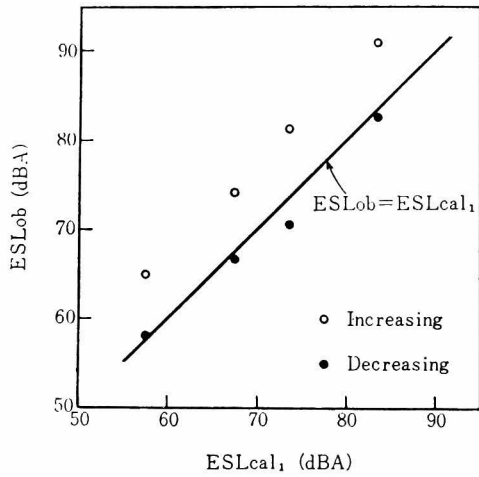


Fig. 6 ESlob vs. $ESLcal_1$ (Increasing and decreasing sound). ESlob of increasing sound is 8.6 dB larger than that of decreasing sound on average.

Table 1 Correlation coefficients, regression coefficients, and deviations of \overline{ESlob} at $X = \overline{X}$ from the line of $ESlob = X$

Type of sound		X			
		L_{eq} (dBA)	$ESLcal_1$ (dBA)	$ESLcal_2$ (dBA)	$ESLcal_3$ (dBA)
Serrate	r	0.981	0.979	0.984	0.984
	m	0.972	0.877	1.008	1.004
	D	0.645	0.905	1.305	1.210
Sinusoidal	r	0.985	0.987	0.986	0.988
	m	1.086	1.147	1.148	1.132
	D	2.400	4.580	4.460	4.120
Normally distributed	r	0.982	0.980	0.983	0.978
	m	1.132	1.128	1.144	1.119
	D	1.415	0.493	0.844	0.241
Equally spaced vehicles model	r	0.986	0.986	0.985	0.986
	m	0.952	0.985	1.095	0.885
	D	0.613	0.288	1.200	-0.550
Convex and concave	r	0.931	0.977	0.987	0.971
	m	1.116	1.252	1.217	1.229
	D	-4.125	-2.605	-1.135	-3.040
Total	r	0.946	0.957	0.968	0.955
	m	1.076	1.097	1.093	1.091
	D	0.378	0.901	1.346	0.604

r ; correlation coefficient, m ; regression coefficient,
D ; $ESlob - \overline{X}$

および下降音 (Decreasing sound) をも加えた 118 個の騒音について、 $ESLcal_1$, $ESLcal_2$, $ESLcal_3$ および L_{eq} に対する $ESLob$ の回帰直線の回帰係数 (m) と相関係数 (r)、および $D(=ESLob-\bar{X})$ を示した。ここに X は $ESLcal_1$, $ESLcal_2$, $ESLcal_3$ もしくは L_{eq} のいずれかであり、 $ESLob$ および \bar{X} はそれぞれ $ESLob$ および X の平均を表わしている。 D はデータの重心と $ESLob=$ X の直線との $ESLob$ 方向の隔たりを示す。回帰係数および相関係数は 1 に近い程、また D は 0 に近い程 X が $ESLob$ によく対応することを意味する。

表からわかるように、各種変動騒音において相関係数は凸型および凹型の変動騒音の L_{eq} の場合に 0.931 である外は全て 0.97 以上となっており、回帰係数は全般に 1 に近い値となっている。 D は正弦波状変動騒音と凸型および凹型変動騒音において若干大きくなっている外は 2 dB 以内である。118 個の刺激音の全体についても相関係数と回帰係数は 1 に近く、 D は小さい。これらの値から、 L_{eq} , $ESLcal_1$, $ESLcal_2$, $ESLcal_3$ の優劣をつけることは困難である。これは一つには、これらの刺激音のほとんどにおいて、 L_{eq} と $ESLcal$ とがほぼ等しいためである。しかし、凸型および凹型の変動騒音の成績 (Fig. 3, 4, 5) からは、 $ESLcal$ が L_{eq} に比べて実験成績との整合性が高いといえる。 $ESLcal$ の中でどれがよいかということは Table 1 の数値からは論じがたい。

Fig. 7, 8, 9, 10¹⁾にはそれぞれ $ESLcal_1$, $ESLcal_2$, $ESLcal_3$ および L_{eq} に対して $ESLob$ をプロットした図を示した。図中の実線は $ESLob=ESLcal_{1,2,3}$ 又は $ESLob=L_{eq}$ の関係を示し、点線は最小自乗法で求めた回帰直線を示している。

4. 実効騒音レベルの計算値 ($ESLcal$) の意義

ESL の計算方法の前提となる仮定 (心理量の加算性) は必ずしも厳密なものではない。レベル変動の時間的順序を無視して取り扱っているが、一般的にはこれを無視することはできない。事実、上昇音の $ESLob$ を $ESLcal$ で予測することはできなかった。しかし筆者が用いた 118 個の変動騒音のうち上昇音を除いては、 $ESLcal$ によってよく $ESLob$ が予測でき、 $ESLcal$ が L_{eq} より広範な適合性を有していることが認められた。すなわち、ESL の計算方法は十分の精度を有する近似的なうるささの予測方法であり、その前提となる心理量の加算性にも意義が認められる。この ESL の計算方法は刺激の効果の平均化の一方式であると解せられるが、これに関する議論は別稿に譲る。以下では評価尺度としての $ESLcal$ について論じ、 $ESLcal$ を用いることの実益を騒音の継続時間の効果および騒音の発生回数の効果との関連で論ずる。

4.1 騒音の評価尺度としての $ESLcal$

従来提案されている変動騒音の評価尺度 (TNI , NPL , L_{eq} , L_{10} , L_{50} 等) では心理量の加算や平均化に関する考察をせずに 1, 2 の物理的パラメータを用いて騒音の評価が行なわれている。これらの評価尺度の中では L_{eq} が出色であることが筆者の実験成績においても確かめられている。したがって、評価尺度としての $ESLcal$ を論ずるには L_{eq} との比較を欠くことができない。

L_{eq} の最大の欠陥はその根拠を「等エネルギー仮説」においていることにある。「等エネルギー仮説」によれば、二つの音のエネルギーが等しければうるささも等しい。言い換えると、人間はまず物理量であるエネルギーを積分し、その後これを心理量に変換していることになる。短音に関する現象についてもこの考え方の不合理なことが指摘⁹⁾ されているのであって、より長時間、時には 24 時間に及ぶ継続時間を有する音に関する現象に「等エネルギー仮説」が成立するとは考えにくい。評価尺度としての L_{eq} が優れているからといって「等エネルギー仮説」が正しいものではないことは凸型変動騒音に関する実験成績からも明らかである。

この点 $ESLcal$ は刺激の効果の重みづけに継続時間の効果を導入して心理量の積分を試みた結果導出されているのが特徴であり、積分方法になお検討すべき点が残されているが、従来提案された物理量に基づく評価尺度とは異なった考え方に立脚している。

$ESLcal$ によって上昇音の $ESLob$ を予測することはできないが、実際の騒音では上昇音のようにレベルが上昇し続けたまま終了することは稀であること、およびレベルが一度上昇した後下降する騒音 (たとえば等間隔モデルに基づく模擬交通騒音) の $ESLob$ は $ESLcal$ で予測できることから考えれば、評価尺度としての $ESLcal$ の実用性は高い。

周波数の重みづけは A 特性が用いられている。これは近年 A 特性の騒音レベルが広く用いられていることによる。

$ESLcal$ の計算に用いる α と β の値は、 $ESLcal$ を評価尺度として用いる場合には、 $ESLcal_3$ で行なったようにそれらの値を固定する必要がある。

$ESLcal$ の計算に用いる式(19)と(13)とは一見複雑に見えるが、 $f(L_A)$ から計算する場合には L_{eq} を計算するのと大差ない計算量で $ESLcal$ を得ることができる。

4.2 継続時間と ESL

騒音の継続時間がうるささに及ぼす効果の研究は航空機騒音を評価する必要が生じて始められた。航空機騒音のようなレベル変動を呈する騒音の継続時間を定義することは厳密には困難であるので、現在は便宜的にピークから 10 dB 下がったレベル以上のレベルの継続する時間 (以下 10 dB 降下継続時間と称す。10 dB 以外の場合

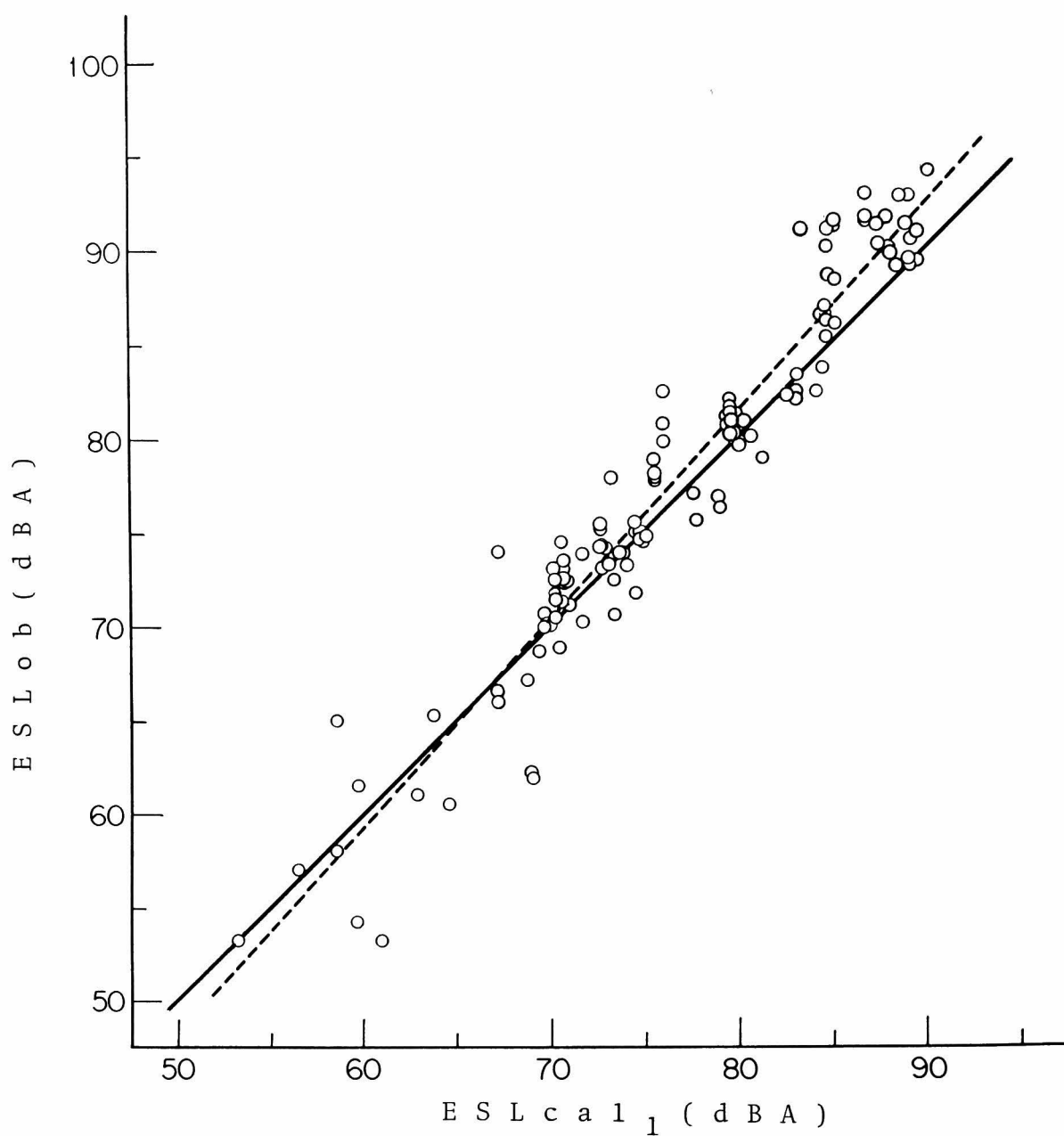


Fig. 7 $ESlob$ vs. $ESLcal_1$ (total).

The solid line indicates the relation; $ESlob = ESLcal_1$, and the dashed line is the regression line of $ESlob$ on $ESLcal_1$.

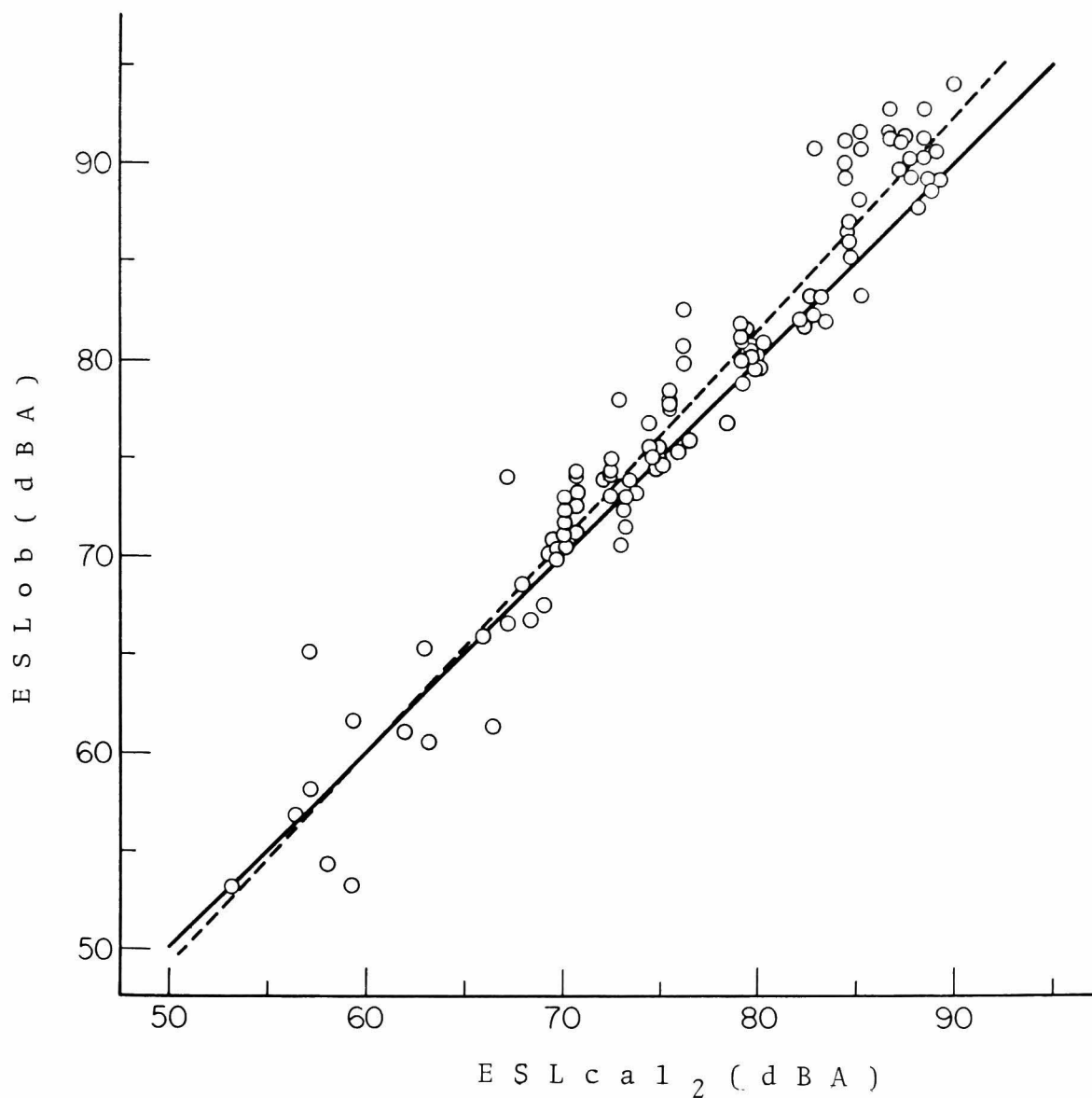


Fig. 8 ESL_{lob} vs. ESL_{cal_2} (total).

The solid line indicates the relation; $ESL_{lob} = ESL_{cal_2}$, and the dashed line is the regression line of ESL_{lob} on ESL_{cal_2} .

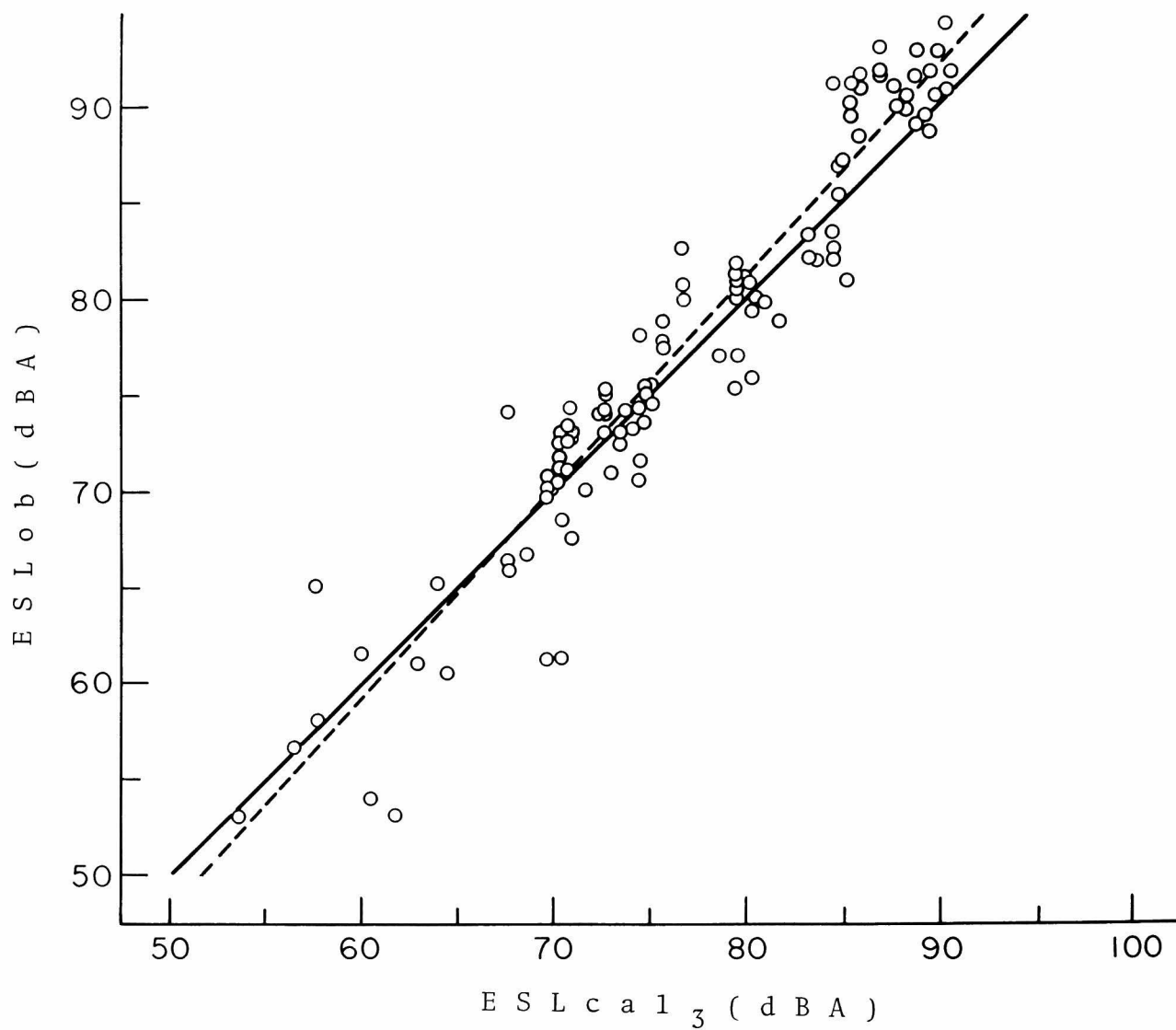


Fig. 9 ESL_{lob} vs. ESL_{cal_3} (total).

The solid line indicates the relation; $ESL_{lob} = ESL_{cal_3}$, and the dashed line is the regression line of ESL_{lob} on ESL_{cal_3} .

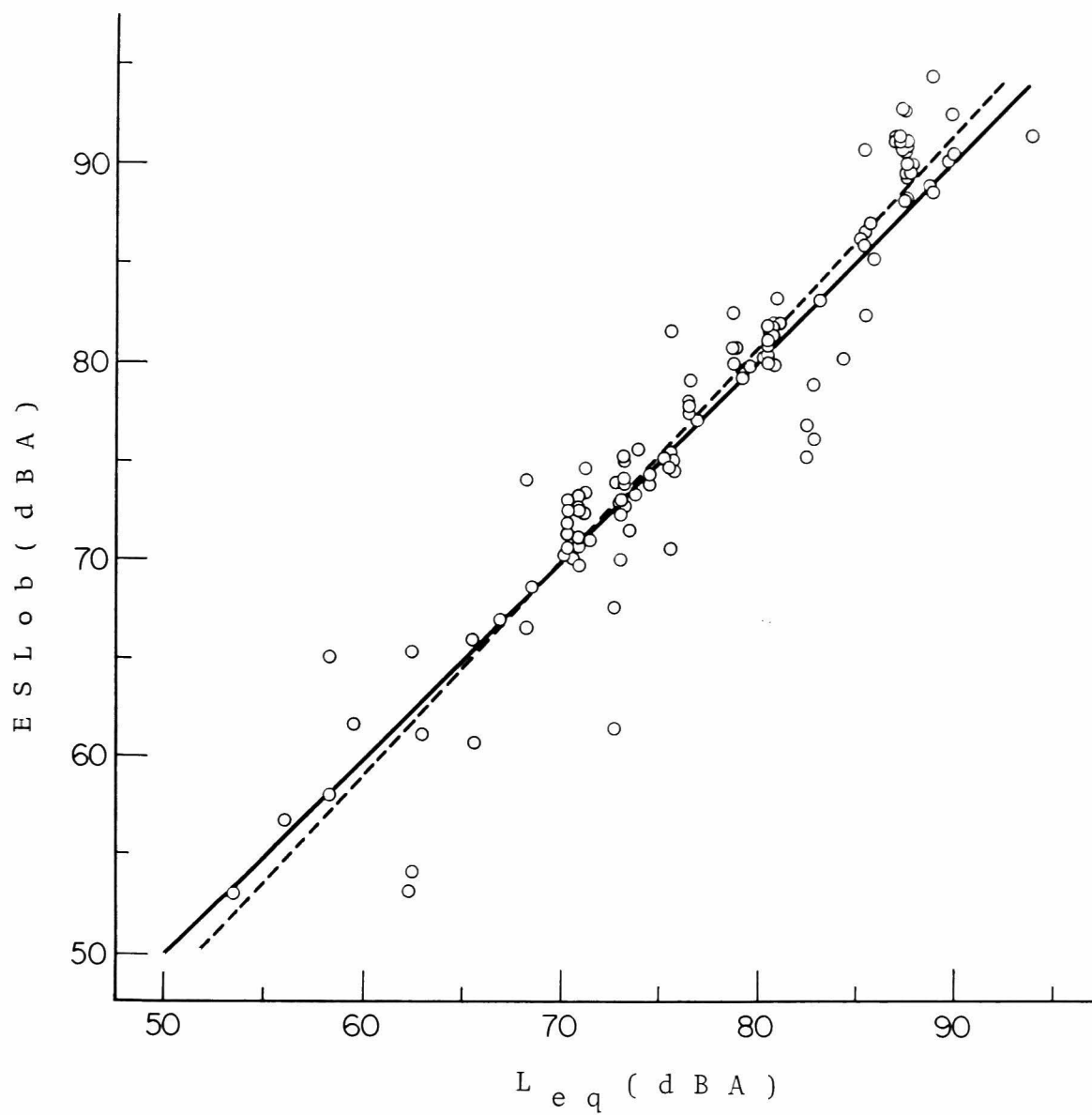


Fig. 10 $ES\ L\ o\ b$ vs. L_{eq} (total).

The solid line indicates the relation; $ES\ L\ o\ b = L_{eq}$, and the dashed line is the regression line of $ES\ L\ o\ b$ on L_{eq} .

も同じ)を継続時間と定義することが広く行なわれている^{9)~12)}。ピークから下がるレベルを10 dB とすることの根拠としては、20 dB 降下継続時間を用いた場合との比較の結果、現行の定義が優れていたこと⁹⁾、およびピークから10 dB 以上降下した部分は騒音の総エネルギーへの寄与が小さいことが考えられる。後者の理由は、継続時間の効果 (penalty for doubling of duration) として3 dB/doublingを採用する「等エネルギー仮説」に立脚したことにほかならない。

航空機騒音のような騒音について継続時間を定義することの実益は、当該航空機騒音をそれとうるささが等価な定常音に置換し、もって種々の航空機騒音の相互比較を可能にすることにある。この定常音のレベルはすなわちESLであり、「等エネルギー仮説」に立脚すれば、叙上のごとく決定した継続時間内の等価騒音レベル (L_{eq}) となる。これに対し、ESLの計算方法の前提となった心理量の加算性に立脚すれば、ピークから10 dB 下がったレベルにおいては心理量はピークのその約半分 ($\phi \propto p^{0.6}$ より、音圧レベルが10 dB 下がると ϕ は約1/2となる) にしかっていない。心理量が1/10以下の部分を無視するとすれば、ピークから30 dB 以下の部分を無視することになって、航空機騒音とうるささが等価な定常音はそのレベルがESLcalになり、また継続時間が30 dB 降下継続時間になる。

この点に関連して最近興味ある報告¹³⁾が行なわれた。すなわち、カテゴリー連続判断法による部分評価と全体評価との比較を行なった結果、ピークより30 dB 以上降下した部分の部分判断を平均すれば、全体判断と部分判断とがよく適合し、ピークより10 dB 又は20 dB 以上降下した部分について同様のことを行なえば、部分判断の平均値が過大となる、という。この成績は上記の考え方を支持するものと思われる。

現実の騒音について30 dB 降下継続時間を採用した場合には、たとえばピークレベルが100 dBAの航空機騒音の継続時間は70 dBA以上のレベルの継続する時間になり、日常経験に近いと考えられる。

4.3 騒音の発生回数とESL

航空機騒音の評価に用いられているNNI, WECPNL, NEFはいずれも騒音の発生回数を考慮した評価尺度である。発生回数を N として、発生回数の評価をNNIでは $15 \log N$ で、またWECPNLとNEFでは $10 \log N$ で行なっている。 $\log N$ の係数はNNIの場合にはアンケート調査との相関をとって決められているが、この相関係数は $\log N$ の係数の値の変化に鈍感であり、2から22まで変えても相関係数は大きく変らない¹⁴⁾。また、 $\log N$ の係数を10とすることは「等エネルギー仮説」を採用することに等しい。

本稿で述べたESLcalの計算方法が妥当であるとすれ

ば、発生回数の効果をESLcalから求めることができる。今、騒音の発生回数を N 、 j 番目に発生する騒音のESLcalに対応する心理量を ϕ_j 、 j 番目の騒音の継続時間を T_j とすると、総合的な心理量 Ψ は式(7)より、

$$\Psi = T^\beta \sum_{j=1}^N \phi_j T_j^\beta / \sum_{j=1}^N T_j^\beta \quad (34)$$

ここに、 $T = \sum_{j=1}^N T_j$ である。

上記3種の評価尺度でも平均的な騒音レベルを有する騒音が N 回発生するとして発生回数の効果が定められているから、今平均的なESLcal (ESLcal) が求められているとすれば、 $T_j = T_0 = \text{const.}$, $\phi_j = \phi_0 = \text{const.}$, $T = T_0 \cdot N$ であるから、

$$\begin{aligned} \Psi &= T^\beta \cdot N \phi_0 \cdot T_0^\beta / N T_0^\beta = (T_0 \cdot N)^\beta \cdot \phi_0 \\ &= N^\beta (\phi_0 T_0^\beta) \end{aligned} \quad (35)$$

よって総合的なESLcal (TESLcalと記す)は、

$$\begin{aligned} \text{TESLcal} &= \frac{10}{\alpha} \log \Psi = \frac{\beta}{\alpha} \times 10 \log N \\ &\quad + \frac{10}{\alpha} \log (\phi_0 \cdot T_0^\beta) \\ &= \frac{10\beta}{\alpha} \log N + \overline{\text{ESLcal}} \end{aligned} \quad (36)$$

で表わされ、右辺の第一項は回数効果を示している。上式より $\log N$ の係数が $10\beta/\alpha$ であることも知られ、 $\alpha = \beta$ の時に10となり、 $1.5\alpha = \beta$ の時に15となる。なお今回筆者らの採用した α, β の数値では $10\beta/\alpha$ の最大は17.4で、最小は11.3であった。

もっとも、実際にESLcalを求めるためには Ψ を計算する必要がある、式(36)は、TESLcalよりむしろESLcalを求めるために有効である。

5. あとがき

継続時間の効果を考慮した心理量の加算に基づく実効騒音レベル (ESL) の計算方法を提案した。それによって計算したESLの値が実測値とよく一致することも認められた。したがって変動騒音の評価尺度としてのESLcalの実用性は高いと考えられるが、ESLcalを評価尺度として用いるために解決すべき問題も残されているので以下に記す。

① α, β の値の確定

α の値がいくらになるかまだ研究者間の意見の一致がみられていない。S.S. Stevens⁴⁾は多数の報告をまとめた結果、 $\alpha=0.33$ を提唱し、ISOのラウドネスレベルの計算式¹⁵⁾やPNLの計算式¹⁶⁾では $\alpha=0.3$ が採用されている。しかし α は0.3か1/3で大方の合意が得られるであろう。一方 β の値に関する資料は非常に少ない。継続時間の効果が騒音レベルによって異なることが知られている⁶⁾¹²⁾から、厳密には β の値も騒音レベルによって変えなければならない。しかし、これ

Table 2 Slopes of regression line of ESlob on ESlcal and correlation coefficients for different values of α and β .

$\alpha \backslash \beta$	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
0.20	m 1.048	1.053	1.058	1.062	1.066	1.068
	r 0.986	0.988	0.989	0.990	0.990	0.990
0.25	m 1.029	1.035	1.041	1.047	1.052	1.056
	r 0.986	0.987	0.989	0.990	0.991	0.992
0.30	m 1.011	1.018	1.025	1.031	1.037	1.043
	r 0.984	0.986	0.988	0.989	0.991	0.992
0.35	m 0.995	1.002	1.010	1.017	1.023	1.030
	r 0.981	0.984	0.986	0.987	0.989	0.991
0.40	m 0.981	0.989	0.996	1.003	0.010	1.017
	r 0.979	0.981	0.983	0.985	0.987	0.989
0.45	m 0.970	0.976	0.983	0.991	0.998	1.005
	r 0.977	0.979	0.981	0.983	0.985	0.987

The slopes and correlation coefficients are insensitive to the change in the values of α and β .

は余りに手法を複雑にするものと思われるので、本論文では β はレベルに無関係として取り扱った。 β の値の確定は継続時間の効果や回数効果とも関係する。継続時間の効果から直接 β の値を確定することは長時間になると困難が伴うから、回数効果やESLcalの適合性等から β の値を決めることになると思われる。今の場合、 $\beta=0.37$ としたが、これを0.3, 0.4あるいは1/3とすることは十分考えられる。

Table 2に α, β を0.2~0.45の各値をとった場合の、ESLobに対するESLcalの回帰直線の回帰係数(m)と相関係数(r)とを記した。これより知られるように、ESLcalの値は α 及び β の値に鈍感である。

②上昇音の取り扱い

ESLcalによって上昇音のESLobを予測できないこと、およびその実用的影響は小さいであろうことはすでに述べた。しかし、何らかの時間的重みづけを与えて計算方法を改良することは考えられる。

③急激なレベル変動を伴う場合

衝撃音のように騒音のレベル変動が非常に急な場合には、聴覚がレベル変動に十分追従しない可能性がある。この場合には、騒音レベルのpdfからESLを計算することができないが、聴覚の時定数を考慮した計測器¹⁷⁾を用いればこの種の騒音のESLも騒音レベルのpdfから計算することはできる。

④長時間にわたる反応との対応

長時間にわたる人間の反応との対応はあらゆる評価尺度の課題であり、ESLcalも当然これを避けることはできない。長時間の反応は社会調査的手法によって得られるから、ESLcalの妥当性もこういった調査で検討する必要がある。ただし、ESLの計算方法の前提において加算性を認めた心理量はベキ法則に従う量であり、アンケート調査によって得られる反応とは異なる。今後、カゴリー評定法によって得られる反応についてもESLの計算方法が適合するかどうか実験的に検討する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 平松幸三, 横江齊, 高木興一, 山本剛夫: 騒音レベルの変動巾および変動速度とうるささとの関係 — 鋸歯状変動騒音による実験 — 日本公衛誌 25 (5) (1978) p. 253
- 2) 平松幸三, 山中浩一, 高木興一, 山本剛夫:

変動騒音のうるささ (騒音レベルの標準偏差と変動周波数の影響), 音響学会誌, 34 (7)

(1978) p. 376

- 3) 平松幸三, 若狭宏, 高木興一, 山本剛夫: 変動騒音のうるささ (L_{eq} の妥当性), 音響学会誌 34 (11) (1978) p. 641

- 4) S.S.Stevens: Psychophysics, John Wiley & Sons, N.Y. (1975) p. 13

- 5) 柿崎祐一: 知覚判断, 培風館, 東京 (1974) p. 34

- 6) 平松幸三, 高木興一, 山本剛夫, 池野淳: 音響学会誌 32 (12) (1976) p. 739

- 7) 難波精一郎, 桑野園子, 加藤徹: 複合音の大きさにおける加算性について, 音響学会聴覚研究会資料 H-46-1 (1976) p. 8

- 8) J.J.Zwislocki: Temporal summation of loudness; an analysis. J.Acoust.Soc. Am., 46 (2) (1969) p.431

- 9) K.S.Pearsons and R.L.Bennett: The effects of temporal and spectral combination on the judged noisiness of aircraft sounds. Fed. Aviation Adm. Rep. No. FAA-NO-69-3 (1969)

- 10) H.J.Parry and J.K.Parry: The interpretation and meaning of laboratory determinations of the effect of duration on the judged acceptability of noise. J. Sound Vib., 20 (1) (1972) p.51

- 11) 平松幸三, 高木興一, 山本剛夫: 新幹線騒音及び模擬騒音のうるささに関する実験, 日本公衛誌 24 (1) (1977) p. 13

- 12) 香野俊一, 曾根敏夫, 二村忠元: 鉄道騒音のうるささに関する考察, 音響学会誌 29 (4) (1973) p. 225

- 13) 桑野園子, 難波精一郎: カテゴリー連続判断法による長時間変動音 (道路騒音) の評価 — 時間的部分判断による全体評価の予測, 音響学会講演論文集 (1978. 5) p. 117

- 14) Dept. Trade and Industry: "Second survey of aircraft noise annoyance around London (Heathrow) airport" Her Majesty's Stationery Office, London, (1971)

- 15) ISO-532: Method for calculating loudness level. (1975)

- 16) ISO-507: Procedure for describing aircraft noise around an airport. (1970)
- 17) E. Zwicker: Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds. J. Acoust. Soc. Am., 62(3) (1977) p.675

第8章 新幹線騒音および模擬騒音 のうるささの定量化

第8章 新幹線騒音及び模擬騒音のうるささの定量化

1. はじめに

新幹線騒音と模擬騒音に対して、前章までの研究成果を適用して、そのうるささの定量化を行なう。

第5, 6章で採用したうるささの測定方法によれば、実験成績そのものが、定常音のレベル (E SL) として得られ、既に一種の定量化が行なわれている。しかし、ここではより低次のデータしか得られない場合のことを想定して、新幹線騒音及び模擬騒音の PSE を三角形状騒音で決定する。測定方法は、PSE の決定ができるならどんな方法でもよいが、ここでは、一対比較マグニチュード評価法を用いている。

2. 模擬騒音および新幹線騒音と基準音との一対比較マグニチュード評価法実験

2.1 実験方法

2.1.1 装置および刺激音

模擬騒音の発生装置等は第2章で用いたものと同様である。新幹線騒音のレベル変動をシミュレートした模擬騒音として、白色騒音で台形状騒音を作製した。

Table 1 に実験に用いた模擬騒音の立上り速度 (R.S.), 立下り速度 (D.S.), ピークの継続時間 (P.D.) およびピークレベル (Lp) の組合せを示した。最右欄に示したおのおの Lp に対して、R.S., D.S., P.D. の組合せがある。A ~ S のアルファベットは、おのおののタイムパターンに対して与えられている。T ~ V は新幹線騒音であり、これについては後述する。表において P.D. が Os となっているのは三角形状騒音のことで、R.S., D.S. が ∞ となっているのは矩形状騒音のことである。矩形状騒音では立上り時間は 0.5 ms 以下となっている。

刺激音として用いた新幹線騒音は、可搬型テープレコーダー (TEAC, R-80) で現場録音した音を編集して、テープレコーダー (TEAC, R-310) で録音、再生し、模擬騒音とまったく同様に取扱った。

Fig. 1 に実験で使った新幹線騒音のレベル変動図形 (ペンスピード; 100 dB/s) を示した。T, U, V の3騒音とも京都府の大山崎付近で録音した騒音であり、T は路線中央から 7 m 離れた地点の地上 2.5 m で、また U および V は路線からおのおの 43 m, 110 m の地点で地上 1.2 m において録音した。T は路線と録音地点とは同じ高さであ

Table 1 Some physical characteristics of stimulus sounds used in the experiment.

Type of noise	R.S. dB/s	D.S. dB/s	P.D. s	Lp dBA	
A	57	2.5	0	65	
B	10	3.3	0		
C	3.3	10	0		
D	2.5	57	0	73	
E	2.5	2.5	4		
F	10	10	4		
G	2.5	50	4	65	
H	5	100	4		
I	10	200	4		
J	50	2.5	4	73	
K	100	5	4		
L	200	10	4		
M	∞	∞	4	80	
N	5	5	1		
O	5	5	2		
P	5	5	4	80	
Q	5	5	8		
R	5	5	16		
S	5	5	32		
T	Super Express Train noises shown in Fig. 1 and Fig. 2				
U					
V					

R.S.: Rising speed, D.S.: Decaying speed,
P.D.: Peak duration, Lp: Peak level.

るが、U, V は高架部である。録音時のピークレベルは SLOW (動特性) で測って、T が 99 dBA, U が 87 dBA, V が 82 dBA であった。T, U, V の騒音のピークレベル (dBA, SLOW) における 1/3 オクターブバンド分析を行った結果を Fig. 2 に示した。

2.1.2. 実験手続き

第2章 4.1.1.2) で記載した通りである。

2.1.3. 被検者

第2章 4.1.1.3) で記載した通りである。

2.2. 実験結果および考察

Fig. 3 に模擬騒音 および新幹線騒音に関するすべての実験結果を示した。図中の A ~ V のアルファベットは模擬騒音のレベル変動図形の型を示しており、その立上り速度、立下り速度およびピークの継続時間は Table 1

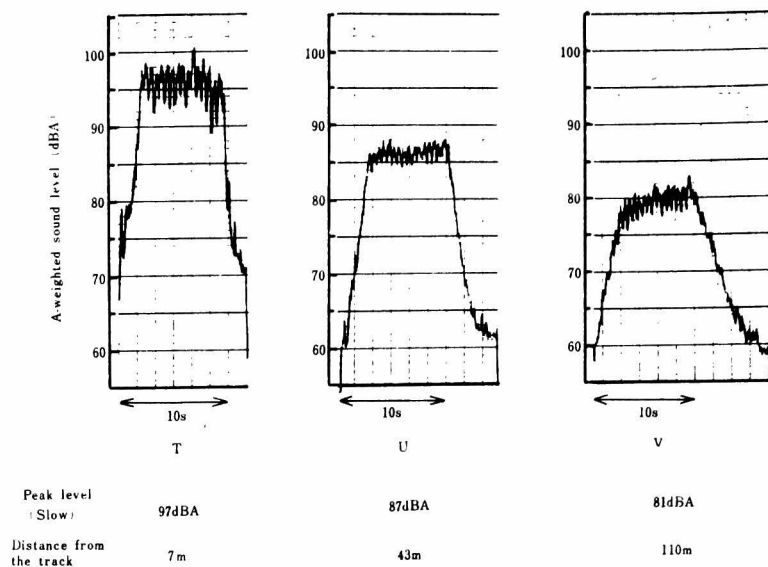


Fig. 1 Sound level of the Super Express Train noises used in the experiment. Pen speed is 100 dB/s.

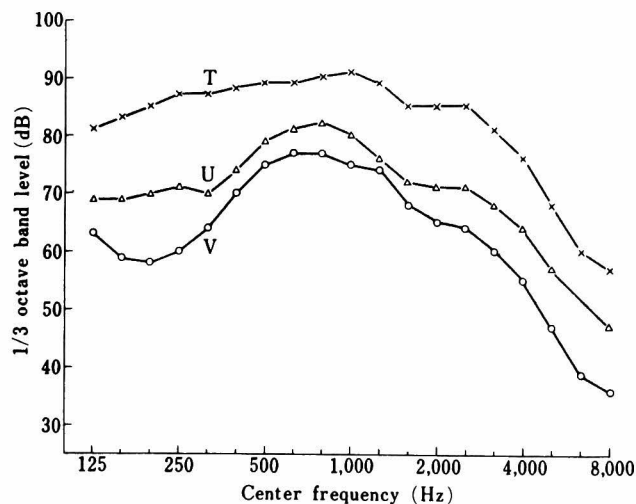


Fig. 2 Results of 1/3 octave band analysis of the Super Express Train noises. T, U and V correspond to T, U and V in Fig. 1.

に示したとおりである。また、T, U, V は新幹線騒音であり、そのレベル変動および周波数構成は Fig. 1, 2 に示した。図の縦軸には模擬音等に対するうるささの比 ψ を対数尺度上にとってあり、横軸には基準音のピークレベル (dBA) をとってある。紙面の節約のため横軸が重なるように図を描いたが、横軸の上側の尺度は白丸で示したデータの尺度であり、下側の尺度は黒丸のそれである (図の横軸の尺度の左端に白丸と黒丸を記したのは、上側の尺度が白丸の、下側の横軸が黒丸のデータに対応していることを示すためである)。たとえば、ピークレベル 65 dB の場合、E は白丸でプロットされているの

で、その横軸の尺度は上側の左から 3 番目の尺度を用い、同じく L は下側の左から 6 番目の尺度を用いる。

図から知られるように、ほとんどすべての実験条件において、基準音のピークレベルの増加とともに、うるささの比 ψ の対数は直線的に増大している。

図においては、縦軸の ψ が 2 倍になる目盛間隔と、横軸の 9 dB の目盛間隔とを等しくとってあるので、第 2 章の成績によれば、Fig. 3 の各直線の傾きは 1 になるはずであるが、実際はほとんどが 1 より低い値となっている。これは第 2 章の成績が magnitude production で得られている一方、Fig. 3 の成績は、magnitude estimation⁹⁾ で得られているため回帰効果が現われたものと解される。さらに、Fig. 3 の直線の傾きにはばらつきがみられる。これらの直線の傾きは、ピークレベルが何 dB 増せばうるささが 2 倍になるかといった尺度構成上の問題としても重要であり、実験条件を考慮した定量化については、今後の検討に待たい。

こうして得られた実験成績は、三角形騒音のピークレベルで表現されており、このままでは、新幹線騒音及び模擬騒音に対して ESL の計算方法を適用しても、実測値の比較ができないので、まず、三角形騒音の ESL を決定する。そのためには、三角形騒音の継続時間を決める必要がある。

これは、前章で論じたように、ピークレベルから 30 dB 降下した時点の継続時間を採用する。今の場合、12s である。ESL の計算方法 ($\alpha = 0.33$ $\beta = 0.37$ としておく) に従って、三角形騒音と

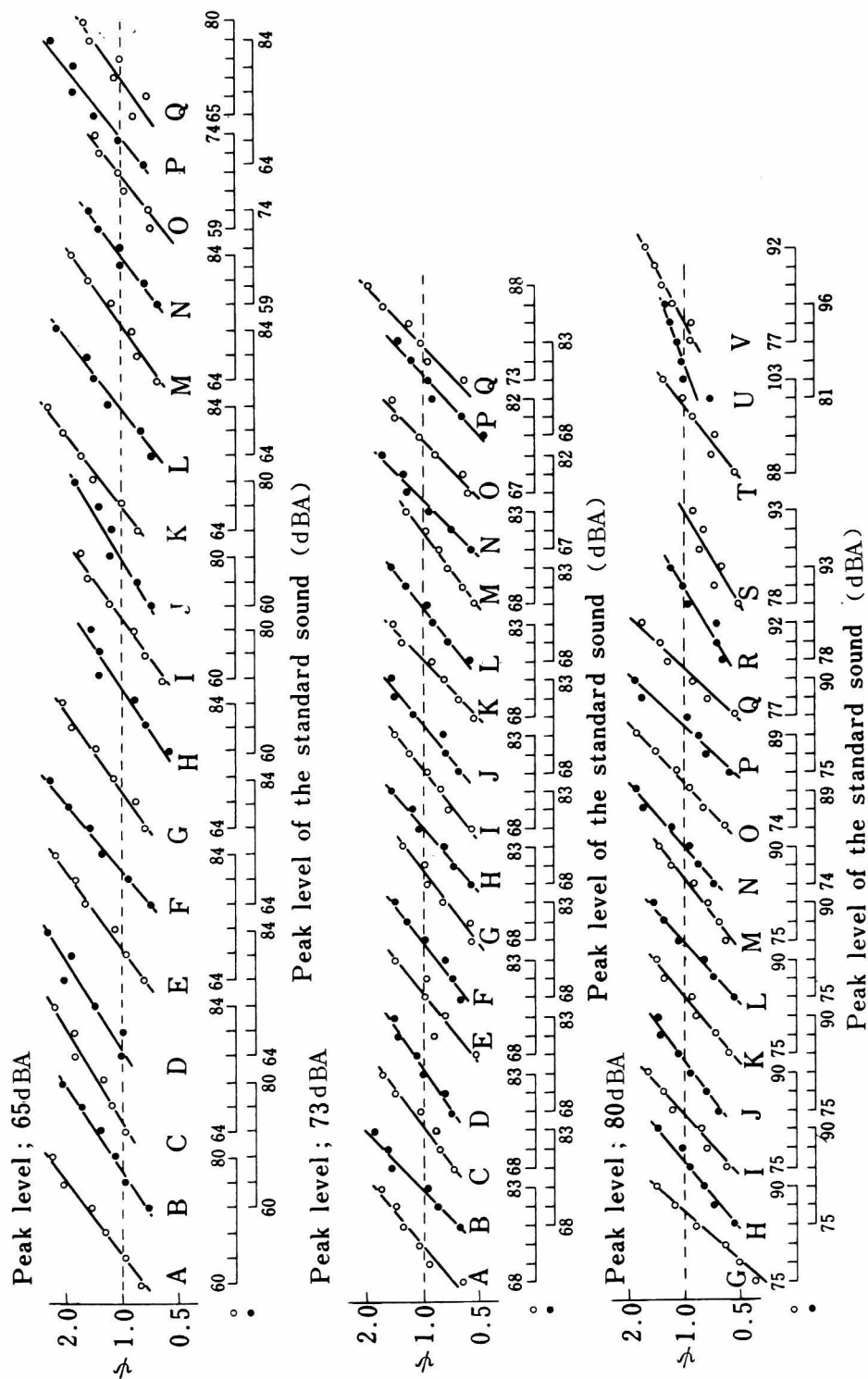


Fig. 3 Experimental results of paired magnitude estimation. Alphabet denotes the type of noise as is shown in Table 1. Open and solid circles correspond to upper and lower abscissae, respectively.

うるささが等価な定常音（継続時間＝12s）のレベルを算出すると、そのレベルはピークレベルから9.3 dB低いレベルとなる。これが、今回の実験で得られたESLの実測値（ESLob）である。

次に、新幹線騒音及び模擬騒音のESLを決定する。この場合も同様に、30dB降下継続時間を計算し、ESLを求める。この継続時間は12sとは異なるため、ESLの実測値とは、このままでは比較できない。よって、第4章の結果を援用して、騒音のレベルと継続時間とのトレードオフ関係を3.4 dB/doublingとし、すべてのESLを継続時間が12sの時のESLに換算する。これが、ESLの計算値（ESLcal）である。

このようにして、12sの継続時間を有する定常音のレベルとして、ESLの実測値と計算値を比較することができる。Fig. 4には、横軸にESLcalを縦軸にESLobをとって、実験成績をプロットした。図中の直線は、両者が等しい時の関係を示してい

る。図から、計算値と実測値とがよく合致していることが知られる。すなわち、この種の刺激音に対しても、ESLの計算方法を適用することができ、その方法はうるささの定量化に有効であるといえることができる。

Fig. 5には、横軸に模擬騒音及び新幹線騒音の L_{en} (PL dB)をとり、縦軸に基準音（三角形状騒音）の L_{en} (PL dB)をとって、Fig. 4と同様にプロットした。図中に引いた直線は、等エネルギー関係を表わす直線である。この図は、 L_{en} によってもうるささがよく予測されうることを示している。しかし、これはこの種の騒音では、 L_{eq} とESLとがほぼ等しい値（ L_{en} には $(10/\alpha) \log \psi = ESL + (10\beta/\alpha) \log T$ が対応する。）をとることによるのであって、ESLの計算方法で仮定した心理量の加算性が成立するなら、 L_{en} によってもうるささが予測されるのは偶然の一致ということになる。

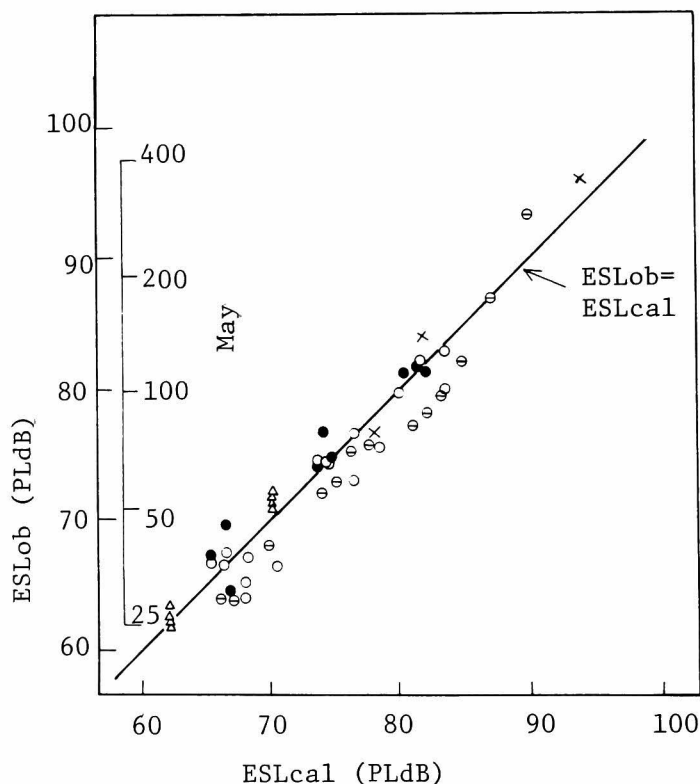


Fig. 4 Relation between ESLob of Super Express Train noises and their simulated noises and ESLcal of the standard sound (PSE).

ESL is expressed in Perceived Level (PLdB). Reference duration is taken as 12s which is 30dB down duration of the standard sound.

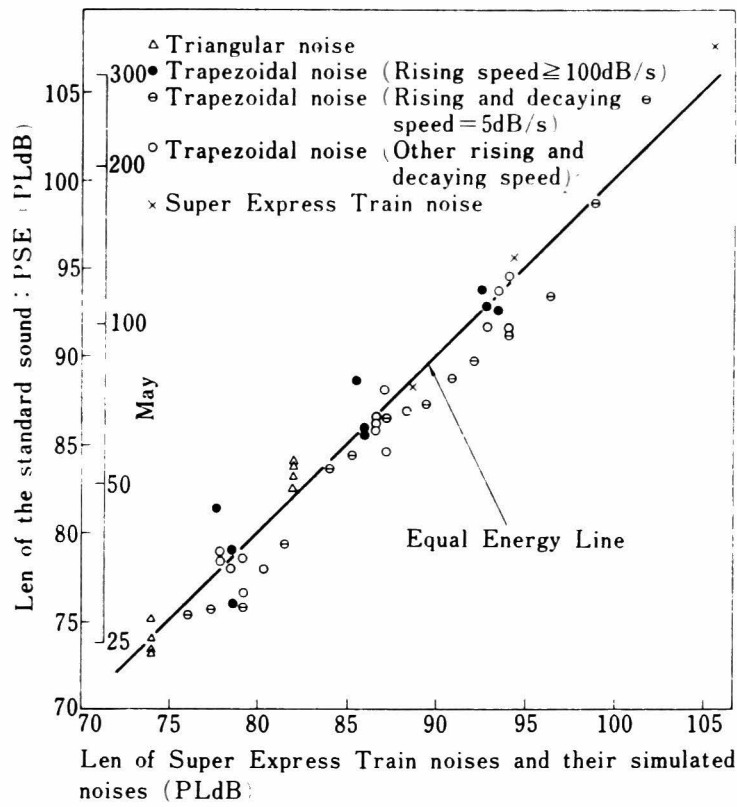


Fig. 5 Relation between L_{en} of Super Express Train noises and their simulated noises and L_{en} of the standard sound (PSE). L_{en} is expressed in Perceived Level (PLdB).

結 言 、 謝 辞

結 言

夥しいといつてよいほど、多くの騒音の評価尺度が提案されている。就中、航空機騒音の評価尺度が多い。騒音の評価尺度が、特定の騒音にのみ適用されるということは、その評価尺度の欠陥である。しかし、一般的な騒音に適用可能である評価尺度が無い時に、航空機騒音のみは、とにかく評価することが必要であったため、当座を凌ぐために、この種の評価尺度を作らざるを得なかった。その後、より一般的な騒音にも適用可能である評価尺度を作ることが試みられた。そのうちで、レベルの変動特性を考慮した評価尺度として、 NPL 、 L_{eq} 、 L_{f1} 等があり、レベルの変動特性を無視した評価尺度として L_{eq} 、 L_{10} 等がある。レベルの変動特性を考慮すべきか否かは、一つには、等エネルギー仮説を容認するかどうかにも係わる。レベルの変動特性を考慮することは、等エネルギー仮説を否定することになるからである。等エネルギー仮説は、航空機騒音の評価尺度にも大巾にとり入れられているし（例えば $WECPNL$ 、 NEF ）、 L_{eq} は完全にこの仮説に立脚したものである。現在（1979年4月）は、評価尺度を L_{eq} に統一しようとする気運にある。10年余り前にも、NRN（Noise Rating Number）で、騒音の評価方法を統一しようとする気運にあったが、これは失敗した。 L_{eq} が今後どのような運命をたどるかはわからないが、仮に、 L_{eq} が世界で唯一の評価尺度として認められても、それは等エネルギー仮説が、科学的に正しいと認められたことを意味するものではない。これも心理量が加算される機序が解明されるまでの、当座を凌ぐための方途に過ぎぬのである。心理量の加算こそが、変動騒音の評価の基本にならなければならない。

本論文で筆者は、まずレベルの変動特性とうるささとの関係を実験的に検討し、併せて等エネルギー仮説についても検討した。次に、心理量の加算方法を仮定して、それに基づく評価尺度を作り、実験成績と比較し、その適用可能性を検討した。以下に、章を追って、この研究で得られた結論を記す。

第1章：研究の基本方針が、騒音を心理現象として把握することであると述べ、変動騒音の評価方法の経緯を、代表的な評価尺度を取りあげて記述し、併せて問題点を指摘した。また、等エネルギー仮説の問題点とそれが用いられている

理由について説明した。最後に、本研究の目的が、変動特性とうるささとの関係を検討すること、等エネルギー仮説を検証すること、既往の評価尺度の適用可能性を検証すること、及び心理量の加算に基づく変動騒音の評価法を開発すること、であると記した。

第2章：研究の方法論として問題となり得る点について考察した。まず、研究方法としては、刺激条件を厳密に規定するために、実験室内における聴取実験による方法を採用したことを述べた。次に、測定対象であるうるささとラウドネスとの関係が論議されているので、この点に関する考えを述べた。また、心理測定法として採用した、マグニチュード評価法について、その問題点と有用性について論じた。マグニチュード評価法の適用可能性に関連して、三角形騒音の尺度構成を比例表出法によって行ない、その結果が、それと等分割法による結果とを併せて検討した修正比例法による尺度構成の結果と矛盾しないことを示した。さらに、一対比較マグニチュード評価法による主観的等価点（PSE）の決定方法について説明した。それによる成績と調整法による成績とを比較した結果、一対比較マグニチュード評価法は、継続時間の効果を調整法より敏感に検出することが知られた。

第3章：騒音の立上り部分を立上り速度で把握し、そのうるささに及ぼす効果を実験的に検討した。被検者は、青年男女各10名でマグニチュード評価法によって、4回繰返して測定した。この実験では、刺激音のレベルと立上り速度を共に変えた。この2つの物理性状を説明変数として、結果を重回帰分析することにより、マグニチュード評価の成績を、相対的な音圧レベルに換算することが可能となった。実験の結果、25～1000 dB/s の範囲でうるささは、立上り速度の対数に比例して増大し、25 dB/s の場合に比べて 1000 dB/s の場合は、音圧レベルに換算して約 2.6 dB の増加に等価であることが知られた。

第4章：騒音の継続時間がうるささに及ぼす効果を測定した。刺激音はホワイトノイズの定常音で、被検者は青年男女各10名である。実験方法はマグニチュード評価法を用いた。継続時間は、60, 70, 80, 90 dB のピークレベルの各々について 30 ms から 90 s の範囲で変化させた。実験の結果、うるささの比と継続時間とは両対数紙上で直線関係にあること、直線の傾きは、ピークレベル

が高いほど急であること、継続時間が2倍になった場合、うるささの増加は平均的にみて、音圧レベルの3.4 dBの増加と等価であること、レベルと継続時間の交互作用を考慮した場合、等うるささを示すコンターは双曲線となるため、継続時間の長さによって継続時間の効果がみかけ上異なるかのような結果となること、等が知られた。

第5章：騒音のレベルの変動特性がうるささに及ぼす効果を実験的に検討した。検討した変動特性は、レベルの変動速度、レベルの変動周波数、レベルの変動巾であり、用いた刺激音は、鋸歯状変動騒音（変動速度と変動巾）、正弦波状変動騒音（変動周波数と変動巾）、1次の自己回帰型ランダム変動騒音（変動巾）、2次の自己回帰型ランダム変動騒音（変動周波数と変動巾）である。また、マグニチュード評価の成績を騒音レベルに換算するために、定常騒音をも刺激音に含めた。変動騒音とうるささが等価な定常音のレベルを実効騒音レベル（ESL）と命名した。実験方法は、マグニチュード評価法で、被検者は青年男女20名又は30名である。実験の結果、これらのレベルの変動特性はうるささに著大な影響を及ぼさないこと、従ってこれらの変動特性を考慮した評価尺度（ TNI, NPL, L_{eq}, L_{f1} ）は妥当でないこと、 $L_{eq}, L_{10}, \bar{L} + \sigma$ 等はいうるささによく対応することが知られた。

第6章： $L_{eq}, L_{10}, \bar{L} + \sigma$ のうちで、いずれが最もよくうるささに対応するかを検討するため、等間隔モデルに基づく模擬交通騒音を用いて、前章と同様な実験を行なった。その結果、 L_{eq} が評価尺度として最もすぐれていることが知られた。次に、等エネルギー仮説の妥当性を検証するため、凸型変動騒音、凹型変動騒音、上昇音、下降音を用いて、前章と同様な実験を行なった。その結果、凸型変動騒音と凹型変動騒音のESLを L_{eq} に対してプロットすると、非線型でかつ単調でない関係が得られた。上昇音と下降音とは、 L_{eq} が等しいが、そのESLは前者が8.6 dB大きかった。このことから、等エネルギー仮説が厳密には成立しないことが明らかとなった。

第7章：心理量の時間的加算は、単純にこれを行なうことはできない。しかし、継続時間の効果をも考慮して、心理量を加算すれば実験成績をよく説明し得ることが明らかとなった。この方法によるとESLを計算することができる。ま

た、 L_{eq} によっては説明できなかった凸型変動騒音、凹型変動騒音の成績をよく説明することができた。但し、上昇音の成績は説明できなかった。さらに、航空機騒音の継続時間をピークから30 dB下った時点の継続時間として定義すべきこと、発生回数の効果が発生回数の対数に比例することも論じられた。

第8章：新幹線騒音およびその模擬騒音を一対比較マグニチュード評価法で測定した。被検者は青年男子8名である。模擬騒音はホワイトノイズの三角形又は台形状騒音である。基準音には三角形騒音を用いた。刺激音と基準音のESLを継続時間12 sとして計算した。12 sというのは、基準音の30 dB降下継続時間である。基準音のESLをESLの測定値として、刺激音のESLに対してプロットした結果、両者により一致がみられ、前章で提案した心理量の加算に基づく評価法の適用可能性が確認された。

これを要するに、①レベルの変動特性は考慮しなくてよい、②等エネルギー仮説は成立しない、③継続時間の効果をも考慮した心理量の加算を仮定すればよい、が結論である。

なお、等エネルギー仮説は否定されたが、それがために評価尺度としての L_{eq} の有用性が損われることはない。等エネルギー仮説と L_{eq} を切離して考え、 L_{eq} を単に近似的な評価尺度であるとみなせば、心理量との対応もよく、計算も比較的簡単である等々の利点が L_{eq} にはある。等エネルギー仮説に対しては反論も多いから、それと表裏一体となっている L_{eq} にも反対があるが、両者を別のものと考え、却って L_{eq} 自身には評価尺度としての支持が増すかもしれない。 L_{eq} は第8章で提案した心理量の加算に基づく評価尺度の近似値を与えるから、この心理量の加算方法は、逆に評価尺度としての L_{eq} の妥当性の根拠を与えることにもなる。

ESLの計算方法については、どの程度の長さの継続時間を有する騒音についてまで適用可能であるのか、という点が問題として残る。これを実験的に検討するには限度があるので、野外調査の資料によって検討しなければならないと思われる。ただし、この場合には測定の精度が悪くなるため、 L_{eq} とESLcalとの優劣を吟味することは不可能と予想される。また、ESLの計算方法の前提となった心理量の加算性については、記憶に関する生理

学的知見が蓄積されればその妥当性を論ずることができるが、現段階では十分な議論をすることができない。

謝 辞

本研究を行なうに際し、終始、熱心な御指導を賜った山本剛夫教授、高木興一助教授に深甚なる謝意を表します。また、友好的な援助を与えられた、横田裕氏、池野淳氏、横江齊氏、山中浩一氏、若狭宏氏に、あわせて感謝の意を表します。最後に、様々な協力をいただいた、被検者の方々に感謝します。

